

repository.ub.ac.id

**PENGARUH HOMOGENITAS MEDAN LISTRIK TERHADAP
KARAKTERISTIK *PARTIAL DISCHARGE* PADA ISOLASI
POLIVYNIL CHLORIDE (PVC)**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

RIDHO DARMAWAN

NIM.145060300111017

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018





LEMBAR PENGESAHAN
PENGARUH HOMOGENITAS MEDAN LISTRIK TERHADAP
KARAKTERISTIK *PARTIAL DISCHARGE* PADA ISOLASI
***POLIVYNIL CHLORIDE* (PVC)**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



RIDHO DARMAWAN
NIM.145060300111017

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 26 Juli 2018

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Dosen Pembimbing

Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D.IPM
NIP. 19730520 200801 1 013

Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.
NIP. 19600701 199002 1 001









JUDUL SKRIPSI:

PENGARUH HOMOGENITAS MEDAN LISTRIK TERHADAP KARAKTERISTIK
PARTIAL DISCHARGE PADA ISOLASI *POLIVYNIL CHLORIDE* (PVC)

Nama Mahasiswa : Ridho Darmawan
NIM : 145060300111017
Program Studi : Teknik Elektro
Konsentrasi : Teknik Energi Elektrik

Komisi Pembimbing :

Ketua : Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.

Tim Dosen Penguji :

Dosen Penguji 1 : Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.

Dosen Penguji 2 : Ir. Wijono, M.T., Ph.D


Dosen Penguji 3 : Dr. Ir. Hari Santoso, M.S.

Tanggal Ujian : 23 Juli 2018

SK Penguji : 1505 Tahun 2018







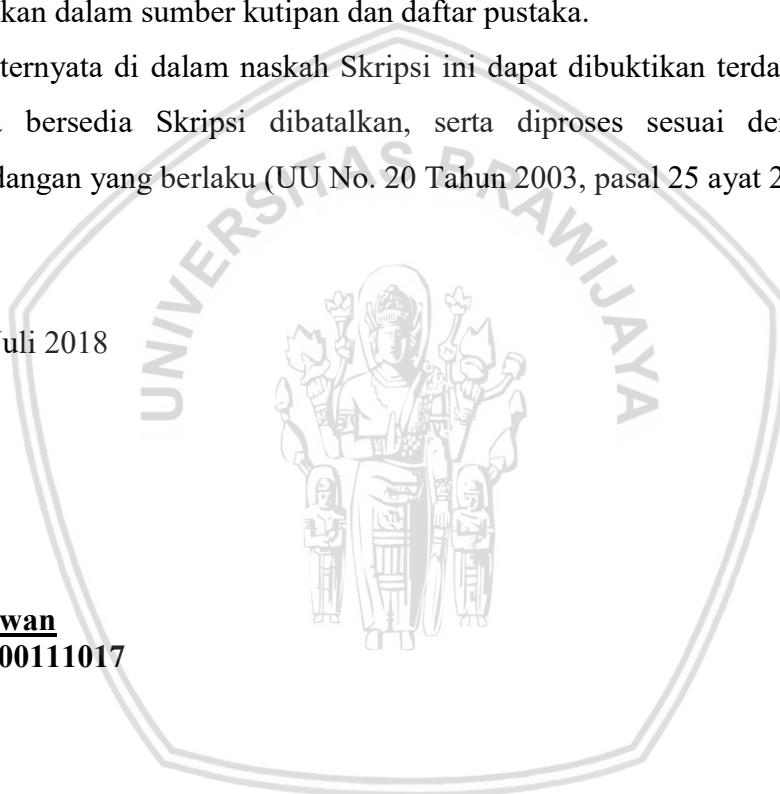
PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Juli 2018
Mahasiswa,

Ridho Darmawan
NIM.145060300111017





RINGKASAN

Ridho Darmawan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2018, *Pengaruh Homogenitas Medan Listrik terhadap Karakteristik Partial Discharge pada Isolasi Polivinyil Chloride (PVC)*, Dosen Pembimbing: Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT.

Perkembangan teknologi dengan berbagai perangkat pendukung kegiatan manusia meningkatkan kebutuhan suplai energi listrik. Isolasi yang baik memegang peranan yang sangat penting dalam menjamin suatu kehandalan dan keamanan sistem ketenagalistrikan. Tetapi nyatanya gangguan maupun kegagalan listrik tetap kerap terjadi, salah satu penyebabnya adalah adanya peluahan parsial. Peluahan parsial menyebabkan material isolasi mengalami penurunan (degradasi) dan untuk beberapa alasan fenomena ini diduga menjadi salah satu awal penyebab terjadinya kegagalan pada isolasi. Ada banyak faktor yang menjadi sebab awal terjadinya peluahan parsial di dalam bahan dielektrik, sehingga penting untuk meninjau parameter apa saja yang mempengaruhi karakteristik dari peluahan parsial.

Penelitian ini, bertujuan: 1). Mengetahui variasi lokasi rongga udara terhadap nilai tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan; 2) Mengetahui variasi ketebalan isolasi terhadap nilai tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan; 3) Mengetahui pengaruh bentuk elektroda terhadap nilai tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan; 4) Mengetahui pengaruh variasi tegangan bolak-balik terhadap jumlah perulangan pulsa peluahan; 5) Mengetahui pengaruh variasi lokasi rongga udara dan ketebalan isolasi terhadap pelepasan muatan peluahan parsial; 6) Mengetahui pengaruh fenomena peluahan parsial terhadap degradasi bahan isolasi yang digunakan.

Dalam penelitian ini dimensi rongga konstan dengan tebal 0.5 mm dan diameter 1 cm ditemukan bahwa: 1) Variasi lokasi rongga mempengaruhi nilai tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan, untuk rongga udara yang lebih dekat dengan elektroda fasa membutuhkan level tegangan mula dan tegangan pemadaman yang kecil hal ini ditunjukkan pada ketebalan isolasi 2 mm tegangan mula rongga atas terjadi pada 4,21 kV sedangkan pada rongga bawah pinggir terjadi pada 7,27 kV; 2) Untuk variasi ketebalan didapatkan bahwa tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan berbanding lurus terhadap nilai ketebalan bahan isolasi, sebagai contoh pada rongga tengah tengah peluahan yang terjadi pada 2 mm sebesar 4,32 kV, 2,5 mm sebesar 5,82 kV, 3 mm sebesar 6,23 kV, dan 3,5 mm sebesar 8,36 kV; 3) Bentuk elektroda mempengaruhi tingkat tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan, karena pola distribusi medan yang diberikan, elektroda piring piring memberikan nilai tegangan mula yang hampir seragam untuk masing-masing posisi (atas tengah pada 5,68 kV, atas pinggir pada 5,63 kV, tengah tengah pada 6,03 kV, tengah pinggir pada 5,93 kV, bawah tengah 6,37 kV, dan bawah pinggir 6,38 kV); 4) Pada terpaan tegangan yang lebih tinggi peluahan yang terjadi menjadi semakin aktif, diamati dengan meningkatnya perulangan pulsa peluahan; 5) Untuk masing-masing posisi nilai pelepasan muatan yang terjadi tidak dipengaruhi oleh lokasi rongga tetapi mengarah pada perbandingan tebal isolasi terhadap dimensi rongga dimana pelepasan muatan rongga bawah tengah pada 2 mm sebesar 356 pC, 2,5 mm sebesar 136 pC, 3 mm sebesar 136 pC, dan 3,5 mm sebesar 76 pC ; 6) Hasil analisa bahan dengan perangkat SEM (*Scanning Electron Microscope*) menunjukkan fenomena peluahan parsial menyebabkan terjadinya degradasi pada bahan isolasi, hal ini ditemukan dengan diamatinya muncul bercak-bercak pada bahan isolasi.

Kata kunci: Peluahan Parsial, Tegangan Mula Peluahan, Tegangan Pemadaman Peluahan Pelepasan Muatan Peluahan, Degradasi Bahan Isolasi



SUMMARY

Ridho Darmawan, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Universitas Brawijaya, July 2018, **Influence of Electricity Homogeneity on Partial Discharge Characteristic in Polivynil Chloride Isulation (PVC)**, Supervisor: Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT.

The development of technology with various supporting tools in human activities increases the need for electricity supply. Good insulation plays a very important role in ensuring a reliability and safety of the electricity system. But in fact the disturbance and failure in electricity remains frequent, one of many causes is the partial discharge phenomenon. Partial discharge causes the insulation material to decrease (degradation) and for some reason this phenomenon is thought to be one of the main causes of failure in isolation system. There so many factors that causes partial discharge in the dielectric material, so it is really important to review what kind of parameters that affect the characteristics of partial discharges phenomenon.

This research, aimed to: 1). Observe the variation of air cavity location to the partial discharge inception dan extinction voltage; 2) Observe the variation of insulation thickness to the partial discharge inception dan extinction voltage; 3) Observe the effect of electrode shape to the partial discharge inception dan extinction voltage; 4) Observe the effect of alternating voltage variation on the pulse repetition number; 5) Observe the effect of air cavity location variation and insulation thickness on discharge characteristic; 6) Know the effect of partial discharge phenomenon on degradation of insulation materials.

In this study, the dimension of the cavity remain constant with 0.5 mm thick and 1 cm diameter we found that: 1) Location variation affects the inception dan extinction voltage, for the air cavity that more close to the phase electrode, the inception and extinction voltage occur at smaller value, for insulating thickness of 2 mm at middle up occurs at 4,21 kV whereas at bottom middle occurs at 7,27 kV; 2) For the thickness variation it is found that the inception dan extinction voltage directly proportional to the thickness of the insulating material, for example in the middle middle cavity for 2 mm happen at 4,32 kV, 2,5 mm happen at 5,82 kV, 3 mm happen at 6,23 kV and 3,5 mm happen at 8,36 kV; 3) The shape of the electrode affects the inception dan extinction voltage of partial discharge, it's all because the given field distribution pattern, plate plate electrode provides a qiutely similary inception voltages for each position (up middle 5,68 kV, up edge at 5,63 kV, middle middle at 6,03 kV, middle edge at 5,93 kV, bottom middle at 6,37 kV, and bottom edge at 6,38 kV); 4) At higher voltage exposures discharge phenomenon become more active, this shown by the increasing pulse number repetition; 5) For different position discharge value is not affected by the cavity location but leads to the ratio of the thickness of the insulation to the cavity dimensions, for bottom middle location for 2 mm at 356 pC, 2,5 mm at 136 pC, 3 mm at 136 pC, and 3,5 mm at 76 pC; 6) The result of material analysis with SEM (Scanning Electron Microscope) device shows that partial discharge phenomenon causing degradation in isolation material, this is found by observing several spots on the insulation material.

Keywords: Partial Discharge, Partial Discharge Inception Voltage, Partial Discharge Extinction Voltage, Discharging Charge, Material Degradation



PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya serta petunjuk-Nya sehingga dapat diselesaikan penulisan laporan skripsi yang berjudul “**Pengaruh Homogenitas Medan Listrik terhadap Karakteristik *Partial Discharge* pada Isolasi Polivynil Chloride (PVC)**”. Laporan ini dibuat dengan tujuan untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi Teknik Energi Elektrik Universitas Brawijaya.

Penyusunan laporan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, untuk itu terima kasih kepada:

1. Bapak Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D., IPM. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Ibu Ir. Nurussa'adah, M.T.. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Bapak Ali Mustofa, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Sarjana Teknik Elektro.
4. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc selaku KKDK Konsentrasi Teknik Energi Elektrik yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun.
5. Bapak Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT. selaku dosen pembimbing skripsi yang dengan sabar memberikan banyak pengarahan dan masukan dalam penyelesaian skripsi ini.
6. Bapak Ramadhani Kurniawan Subroto, ST., MT. selaku dosen pembimbing akademik yang sabar dalam mengarahkan dalam perkuliahan selama ini.
7. Kedua orang tua tercinta, Bapak Sunarto dan Ibu Endang Pristiwati yang senantiasa mendoakan dalam memberi nasihat, perhatian, dorongan dan kesabaran selama ini.
8. Seluruh anggota Laboratorium Tegangan Tinggi yang telah banyak meluangkan waktu dan tempatnya serta memberikan banyak pengarahan dalam melaksanakan penelitian ini.
9. Rekan-rekan karya ilmiah Tim POTRET serta Tim JADE yang telah memberikan pengalaman dan pembelajaran berharga dalam berkarya.
10. Keluarga besar Konsentrasi Teknik Energi Elektrik, Power'14, dan Dioda'14 yang telah menemani dan saling mendukung selama menjalani perkuliahan.
11. Kepada teman-teman asisten Laboratorium Mesin Elektrik yang telah memberi semangat untuk mengerjakan skripsi.
12. Sahabat-sahabat saya di Workshop Divisi Line Tracer Community yang telah memberi semangat.

13. Serta ucapan terimakasih yang banyak kepada seluruh teman-teman saya, kakak-kakak tingkat saya, dan adik-adik tingkat saya yang tidak mungkin saya sebut satu persatu disini.

Sekiranya Tuhan YME mencatat amalan ikhlas kami dan semua pihak yang turut membantu sehingga skripsi ini terselesaikan. Akhirnya, saya menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna namun semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. Amin.

Malang, Juli 2018

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Isolasi Polimer pada Kabel	5
2.2 Peluahan Sebagian (<i>Partial Discharge</i>).....	7
2.2.1 Peluahan Parsial Luar	8
2.2.2 Peluahan Parsial Dalam	10
2.3 Sinyal Masukan Alat Ukur Peluahan Parsial	16
2.3.1 Hubungan q dengan Disipasi Energi	17
2.3.2 Hubungan q dengan Dimensi Rongga	17
2.4 Aplikasi Peluahan Parsial pada Sistem Tenaga Listrik.....	18
2.5 Alat-alat Pendukung Pengujian <i>Partial Discharge</i>	21
2.5.1 Elektroda CIGRE Metode II.....	21
2.5.2 Scanning Electron Microscope (SEM)	22
BAB III METODE PENELITIAN.....	25
3.1 Studi Literatur	25
3.2 Persiapan	26
3.2.1 Persiapan Alat dan Fungsinya	26
3.2.2 Persiapan Objek Uji.....	27
3.2.3 Persiapan Elektroda Uji	27
3.2.4 Persiapan Rangkaian Pembangkitan Tegangan Tinggi AC.....	27
3.3 Mekanisme Pengujian Obyek Uji	28
3.4 Mekanisme Pengujian dan Pengolahan Data	30

3.5 Pengujian Variasi Lokasi Rongga Udara dan Ketebalan Dielektrik terhadap Tegangan Mula dan Tegangan Pemadaman <i>Partial Discharge</i>	30
3.6 Pengujian Variasi Tegangan terhadap Karakteristik Jumlah Pulsa dan Muatan Peluahan Parsial.....	31
3.7 Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Pengujian Isolasi Polivynil Chloride ...	32
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Tinjauan Umum	35
4.2 Pengaruh Variasi Lokasi Rongga Udara (Void) terhadap Tingkat Tegangan Mula Peluahan Parsial / Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) dan Tegangan Pemadaman Peluahan Parsial / Partial Discharge Extinction Voltage (PDEV) ..	36
4.3 Pengaruh Variasi Ketebalan Material Isolasi terhadap Tingkat Tegangan Mula Peluahan Parsial / Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) dan Tegangan Pemadaman Peluahan Parsial / Partial Discharge Extinction Voltage (PDEV) ..	40
4.4 Pengaruh Variasi Elektroda Homogen dan Non-Homogen terhadap Tingkat Tegangan Mula Peluahan Parsial / Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) dan Tegangan Pemadaman Peluahan Parsial / Partial Discharge Extinction Voltage (PDEV).....	44
4.5 Pengaruh Variasi Tegangan Uji Arus Bolak-Balik terhadap Intensitas Perulangan Pulsa Peluahan Parsial	47
4.6 Pengaruh Variasi Lokasi Rongga Udara dan Ketebalan Isolasi terhadap Pelepasan Muatan Peluahan Parsial.....	64
4.7 Pengaruh Aktivitas Peluahan Parsial terhadap Penurunan Kualitas Bahan Isolasi	66
BAB V PENUTUP.....	73
5.1 Kesimpulan.....	73
5.2 Saran	74
DAFTAR PUSTAKA	75
LAMPIRAN.....	77

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Judul	Halaman
Gambar 2. 1.	Susunan elektroda peluahan parsial luar dan rangkaian ekuivalen	8
Gambar 2. 2.	Kurva tegangan pada rangkaian ekuivalen untuk pola peluahan parsial luar berbentuk pulsa.....	9
Gambar 2. 3.	Laju pengulangan pulsa peluahan parsial luar sebagai fungsi terpaan tegangan	9
Gambar 2. 4.	Model rongga udara dalam media isolasi padat	11
Gambar 2. 5.	Pemodelan void didalam bahan isolasi padat dalam rangkaian ekuivalen listrik	13
Gambar 2. 6.	Pola peluahan parsial dalam pada material isolasi	14
Gambar 2. 7.	Penampang melintang dari kabel koaksial	15
Gambar 2. 8.	Kemungkinan tempat ditemukannya rongga pada system tenaga.....	18
Gambar 2. 9.	Model isolasi dan pelemahan sinyal elektrik yang terjadi dalam bahan	19
Gambar 2. 10.	Model rongga udara dan pelemahan sinyal elektrik yang terjadi dalam bahan	19
Gambar 2. 11.	Grafik peluahan parsial terhadap waktu kegagalan isolasi sistem.....	20
Gambar 2. 12.	Ilustrasi kecacatan dan rangkaian ekuivalen total material secara elektrik ..	21
Gambar 2. 13.	Konfigurasi elektode CIGRE metode 1	21
Gambar 2. 14.	Konfigurasi elektode CIGRE metode 2.....	22
Gambar 2. 15.(a)	Scanning Electron Microscope (b) Display SEM	23
Gambar 3. 1.	Diagram alir analisis penelitian	25
Gambar 3. 2.	Rangkaian pengujian pembangkitan tegangan tinggi AC	28
Gambar 3. 3.	Obyek uji PVC dengan rongga udara sebagai model kecacatan dalam bahan	29
Gambar 3. 4.	Konfigurasi elektroda II CIGRE.....	29
Gambar 3. 5.	Konfigurasi elektroda piring-piring.....	29
Gambar 3. 6.	Data hasil pengukuran osiloskop berupa ekstensi file CSV	30
Gambar 3. 7.	Diagram pengujian tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan terhadap variasi lokasi rongga dan ketebalan isolasi.....	31
Gambar 3. 8.	Diagram pengukuran variasi tegangan bolak-balik terhadap karakteristik perulangan pulsa dan muatan peluahan parsial	32
Gambar 3. 9.	Diagram alir simulasi medan listrik pada obyek uji <i>Polivynil Chloride</i> dengan software FEMM 4.2.....	33
Gambar 4. 1.	Susunan pengujian peluahan parsial pada material <i>Polivynil Chloride</i> susunan elektroda homogen (piring-piring)	35
Gambar 4. 2.	Susunan pengujian peluahan parsial pada material <i>Polivynil Chloride</i> susunan elektroda non-homogen (bola-piring).....	36

Gambar 4. 3. Simulasi distribusi medan listrik isolasi PVC ketebalan 2 mm : (a) atas tengah (b) atas pinggir	39
Gambar 4. 4. Simulasi distribusi medan listrik isolasi PVC ketebalan 2 mm : (a) tengah tengah (b) tengah pinggir	39
Gambar 4. 5. Simulasi distribusi medan listrik isolasi PVC ketebalan 2 mm : (a) bawah tengah (b) bawah pinggir.....	39
Gambar 4. 6. Pengaruh variasi ketebalan material dielektrik <i>Polivynil Chloride</i> terhadap tingkat tegangan mula peluahan parsial	41
Gambar 4. 7. Pengaruh variasi ketebalan material dielektrik <i>Polivynil Chloride</i> terhadap tingkat tegangan pemadaman peluahan parsial	43
Gambar 4. 8. Simulasi distribusi medan listrik pada isolasi <i>Polivynil Chloride</i> rongga tengah tengah ketebalan : (a) 2 mm (b) 2,5 mm (c) 3 mm (d) 3,5 mm	44
Gambar 4. 9. Simulasi distribusi medan listrik isolasi <i>Polivynil Chloride</i> ketebalan 3 mm rongga tengah pinggir elektroda : (a) Metode II CIGRE (b) Piring Piring	46
Gambar 4. 10. Simulasi distribusi medan listrik isolasi <i>Polivynil Chloride</i> ketebalan 3 mm rongga tengah tengah : (a) Metode II CIGRE (b)Piring Piring.....	46
Gambar 4. 11. Pola perulangan pulsa peluahan parsial isolasi <i>Polivynil Chloride</i> rongga tengah tengah ketebalan 2 mm dengan tegangan uji: (a) 4,32 kV (b) 6,22 kV (c) 8,57 kV (d) 10,55 kV (e) 12,45 kV	50
Gambar 4. 12. Pola perulangan pulsa peluahan parsial isolasi <i>Polivynil Chloride</i> rongga bawah tengah ketebalan 3 mm dengan tegangan uji : (a)5,16 kV; (b)7,14 kV; (c)9,15 kV; (d)11,49 kV; (e) 13,97 kV	62
Gambar 4. 13. Pola perulangan pulsa peluahan parsial isolasi <i>Polivynil Chloride</i> rongga atas pinggir ketebalan 3.5 mm dengan tegangan uji:(a) 10,46 kV (b) 12,54 kV (c) 14,59 kV (d) 16,60 kV (e) 18,85 kV	63
Gambar 4. 14. Dielektrik PVC pengujian peluahan parsial rongga udara atas pinggir	66
Gambar 4. 15. Dielektrik PVC pengujian peluahan parsial rongga udara tengah tengah...	67
Gambar 4. 16. Tampak Samping dielektrik PVC pengujian peluahan parsial rongga udara tengah tengah.....	67
Gambar 4. 17. Hasil foto SEM obyek uji isolasi <i>Polivynil Chloride</i> sebelum diterpa <i>Partial Discharge</i> perbesaran 200 X	68
Gambar 4. 18. Hasil foto SEM obyek uji isolasi <i>Polivynil Chloride</i> sebelum diterpa <i>Partial Discharge</i> perbesaran 1000 X	68
Gambar 4. 19. Hasil foto SEM obyek uji rongga udara atas pinggir elektroda piring piring ketebalan 3 mm perbesaran 200 X	69
Gambar 4. 20. Hasil foto SEM obyek uji rongga udara atas pinggir elektroda piring piring ketebalan 3 mm perbesaran 1000 X	69
Gambar 4. 21. Hasil foto SEM obyek uji rongga udara tengah tengah elektroda Metode II CIGRE ketebalan 3 mm perbesaran 200 X	70
Gambar 4. 22. Hasil foto SEM obyek uji rongga udara tengah tengah elektroda Metode II CIGRE ketebalan 3 mm perbesaran 1000 X	70

DAFTAR TABEL

Nomor	Judul	Halaman
Tabel 4. 1.	Pengaruh lokasi rongga udara (void) terhadap tingkat tegangan mula peluahan parsial dan tegangan pemadaman peluahan parsial pada isolasi ketebalan 2 mm	37
Tabel 4. 2.	Pengaruh lokasi rongga udara (void) terhadap tingkat tegangan mula peluahan parsial dan tegangan pemadaman peluahan parsial pada isolasi ketebalan 2.5 mm	37
Tabel 4. 3.	Pengaruh lokasi rongga udara (void) terhadap tingkat tegangan mula peluahan parsial dan tegangan pemadaman peluahan parsial pada isolasi ketebalan 3 mm	37
Tabel 4. 4.	Pengaruh lokasi rongga udara (void) terhadap tingkat tegangan mula peluahan parsial dan tegangan pemadaman peluahan parsial pada isolasi ketebalan 3.5 mm	38
Tabel 4. 5.	Pengaruh ketebalan material isolasi terhadap tingkat tegangan mula peluahan parsial	40
Tabel 4. 6.	Pengaruh ketebalan material isolasi terhadap tingkat tegangan pemadaman peluahan parsial.....	42
Tabel 4. 7.	Pengaruh lokasi rongga udara terhadap tingkat tegangan mula peluahan parsial dan tegangan pemadaman peluahan parsial pada konstruksi elektroda piring-piring dengan ketebalan dielektrik 3 mm	45
Tabel 4. 8.	Pengaruh lokasi rongga udara terhadap tingkat tegangan mula peluahan parsial dan tegangan pemadaman peluahan parsial pada konstruksi elektroda II CIGRE dengan ketebalan dielektrik 3 mm	45
Tabel 4. 9.	Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah tengah ketebalan 2 mm	47
Tabel 4. 10.	Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah tengah ketebalan 2 mm	48
Tabel 4. 11.	Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas tengah ketebalan 2 mm.....	48
Tabel 4. 12.	Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas pinggir ketebalan 2 mm.....	48
Tabel 4. 13.	Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah pinggir ketebalan 2 mm	49
Tabel 4. 14.	Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah pinggir ketebalan 2 mm	49
Tabel 4. 15.	Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah tengah ketebalan 2.5 mm	51
Tabel 4. 16.	Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah tengah ketebalan 2.5 mm	51
Tabel 4. 17.	Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas tengah ketebalan 2.5 mm.....	51
Tabel 4. 18.	Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas pinggir ketebalan 2.5 mm.....	52

Tabel 4. 19. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah pinggir ketebalan 2.5 mm	52
Tabel 4. 20. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah pinggir ketebalan 2.5 mm	52
Tabel 4. 21. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah tengah ketebalan 3 mm.....	53
Tabel 4. 22. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah tengah ketebalan 3 mm	53
Tabel 4. 23. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas tengah ketebalan 3 mm	53
Tabel 4. 24. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas pinggir ketebalan 3 mm	54
Tabel 4. 25. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah pinggir ketebalan 3 mm	54
Tabel 4. 26. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah pinggir ketebalan 3 mm	54
Tabel 4. 27. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah tengah ketebalan 3.5 mm.....	56
Tabel 4. 28. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah tengah ketebalan 3.5 mm	56
Tabel 4. 29. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas tengah ketebalan 3.5 mm	57
Tabel 4. 30. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas pinggir ketebalan 3.5 mm	57
Tabel 4. 31. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah pinggir ketebalan 3.5 mm	57
Tabel 4. 32. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah pinggir ketebalan 3.5 mm	58
Tabel 4. 33. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas tengah ketebalan 3 mm elektroda piring piring	58
Tabel 4. 34. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas pinggir ketebalan 3 mm elektroda piring piring ...	59
Tabel 4. 35. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah tengah ketebalan 3 mm elektroda piring piring	59
Tabel 4. 36. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah pinggir ketebalan 3 mm elektroda piring piring	59
Tabel 4. 37. Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah pinggir ketebalan 3 mm elektroda piring piring	59
Tabel 4. 38. Pengaruh variasi posisi rongga udaran dan ketebalan isolasi terhadap tingkat pelepasan muatan peluahan parsial pada siklus positif tegangan positif obyek uji isolasi <i>Polivynil Chloride</i>	65

Tabel 4. 39. Pengaruh variasi posisi rongga udaran dan ketebalan isolasi terhadap tingkat pelepasan muatan peluahan parsial pada siklus positif tegangan negatif obyek uji isolasi <i>Polivynil Chloride</i>	65
--	----





DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Dokumentasi kegiatan dan perangkat pengujian	77
Lampiran 2.	Simulasi distribusi tegangan, medan listrik, dan kurva medan terhadap jarak elektroda Metode II CIGRE dengan perangkat FEMM 4.2	80
Lampiran 3.	Simulasi distribusi tegangan, medan listrik, dan kurva medan terhadap jarak elektroda piring piring dengan perangkat FEMM 4.2	103
Lampiran 4.	Hasil pengukuran partial discharge dengan Osiloskop sebagai fungsi variasi lokasi rongga udara, ketebalan isolasi, dan bentuk elektroda.....	107
Lampiran 5.	Hasil citra pencuplikan kekasaran permukaan isolasi Polivynil Chloride dengan perangkat <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	123





BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Perkembangan teknologi dengan berbagai perangkat pendukung kegiatan manusia meningkatkan kebutuhan suplai energi listrik. Suplai energi listrik yang berasal dari berbagai pembangkit listrik membutuhkan suatu sistem ketenagalistrikan yang kompleks. Diantara sekian banyak komponen-komponen penting dalam penyaluran energi listrik, isolasi memegang peranan penting dalam menjamin suatu kehandalan, keamanan, dan kontinuitas penyaluran sistem tenaga listrik. Pengisolasian peralatan listrik baik dari suatu sistem pembangkit, saluran transmisi, saluran distribusi hingga sampai ke konsumen membutuhkan ketepatan dalam pemilihan bahan yang digunakan disamping pertimbangannya secara ekonomis. Pemilihan bahan isolasi penting menimbang aspek-aspek diantaranya kemampuan material tersebut sehingga mampu menahan arus agar tidak mengalir ke bagian yang tidak diinginkan. Sifat kelistrikan suatu isolasi mencakup resistivitas, permitivitas, dan kerugian dielektrik. Di samping itu hal yang perlu dipertimbangkan adalah sifat termal, sifat mekanis, dan sifat kimia dari bahan. Dalam mendesain suatu bahan isolasi dibutuhkan isolasi yang memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi, kekuatan mekanik yang baik, dan mampu menahan suhu dengan rentang luas.

Sistem isolasi memegang peranan penting dalam menjamin kehandalan, keamanan, dan kontinuitas tenaga listrik, tetapi nyatanya gangguan maupun kegagalan listrik masih kerap terjadi sebabnya beragam mulai dari kerugian akibat kegagalan disipasi panas secara konveksi yang menimbulkan pemanasan yang kuat pada bahan dielektrikum, tekanan mekanis akibat gaya tarik menarik kedua elektroda saat diberikan polaritas yang berbeda (Arismunandar, 1983), ketidakseragaman medan listrik pada bahan yang berdampak pada munculnya korona dan peluahan parsial akibat adanya kecacatan material (Tobing, Teknik Pengujian Tegangan Tinggi, 2012), dan banyak sebab lainnya. Gangguan pada isolasi hingga menyebabkan kegagalan bergantung dari lamanya penerpaan dan efek yang diberikan oleh fenomena terkait. Isolasi gagal secara total dapat terjadi pada hitungan kurun waktu singkat ataupun jangka panjang bergantung dari jenis gangguan dan kualitas bahan yang digunakan.

Fenomena peluahan parsial dalam material isolasi menyebabkan material isolasi menurun dan untuk beberapa alasan fenomena ini menjadi salah satu penyebab terjadinya

kegagalan pada isolasi. Degradasi dari peluahan parsial adalah suatu faktor penting yang menentukan umur bahan isolasi polimer (Ishida, Mizuno, Nagao, & Kosaki, 1991). Proses fisis yang terjadi dalam material akibat fenomena ini perlahan mengikis dinding isolasi yang digunakan akibat pelepasan busur api yang terjadi sehingga terjadi pelepasan kimiawi pada material, benturan elektron pada anoda menyebabkan terkikisnya dinding isolasi sedangkan benturan ion positif pada katoda menyebabkan kenaikan suhu bahan berdampak pada ketidakstabilan termal bahan (Arismunandar, 1983). Peluahan parsial dapat terjadi dari beragam faktor. Sebagai contoh pada isolasi dengan material komposit, rongga udara hadir dalam bahan sebagai akibat dari proses manufaktur atau akibat tekanan mekanis pada bahan, kelembapan pada serat, delaminasi antara serat, dan matriks atau retak akibat stres mekanis yang tinggi dapat menyebabkan rongga panjang (Burgener & Frohlich, 2001).

Fenomena peluahan parsial pada penerapan tegangan AC memerlukan perhatian khusus lantaran perilaku muatan bolak balik yang terjadi pada kecacatan rongga udara dalam material dinilai lebih efektif dan cepat mempengaruhi penurunan kualitas bahan isolasi. Penerapan tipe tegangan yang berbeda akan memberikan karakteristik yang berbeda pada pola pulsa peluahan parsial, dari studi yang dilakukan pada pengujian antara penerapan tegangan DC yang memiliki ripple (Li, Zhang, Han, Yao, & Li, 2016) dan tegangan AC yang dicampurkan dengan tegangan DC (Li, Han, Liu, Yao, & Li, 2015) ditunjukkan bahwa komponen tegangan AC memberikan efek yang dominan dalam karakteristik pulsa peluahan parsial jika dibandingkan komponen tegangan DC.

Hingga saat ini pengembangan teori terkait dengan peluahan parsial terus diteliti, karena belum adanya variable-variable terikat untuk fenomena peluahan parsial. Teori peluahan parsial melibatkan analisis material, medan elektrik, karakteristik busur listrik, pelemahan pulsa elektrik, sensitivitas sensor, respon frekuensi, *noise* dan interpretasi data. Beberapa penelitian memberikan perlakuan seperti variasi tekanan dan tipe tegangan (Burgener & Frohlich, 2001), suhu bahan (di Lorenzo del Casale & Schifani, 2007), kelembapan (Rokunohe, Kato, Kojima, Hayakawa, & Okubo, 2017), dan penerpaan tegangan impuls (Ishida, Nagao, & Kosaki, Effect of Instantaneous Voltage Change Rate on Apperance of Swarming Pulsive Microdischarges, 1989) untuk menganalisa dan mengungkap variable yang mungkin memberikan pengaruh terhadap karakteristik *partial discharge* yang terjadi di dalam bahan. Besarnya peluahan parsial dihubungkan dengan tingkat kerusakan yang terjadi pada material isolasi. Jumlah pulsa peluahan parsial yang terjadi bergantung sesuai dengan level tegangan maksimum yang diterapkan pada sistem tenaga. Kedua parameter ini memegang peranan yang penting untuk meninjau sejauh mana fenomena peluahan telah

mempengaruhi umur suatu bahan. Dengan menganalisa pulsa peluahan diharapkan kita mampu mencari dimana akar dari permasalahan yang terjadi dalam bahan. Dengan membandingkan hasil pengulangan pulsa peluahan antara siklus positif dan negatif pada tegangan kita mampu memperkirakan dimana kecacatan bahan berawal (Paoletti & Golubev, 1999).

Kendati peluahan parsial mampu menyebabkan terjadinya penuaan pada bahan isolasi ada beberapa langkah-langkah yang dapat dilakukan untuk mengurangi ataupun menghindari fenomena peluahan parsial diantaranya menghindari dekontaminasi dari isolasi selama proses produksi, menghindari titik-titik yang memiliki ujung tajam sebagai upaya homogenitas medan, meningkatkan jarak rambat dan celah udara untuk mengurangi tekanan medan, meningkatkan ketebalan material isolasi, menghindari lompatan permitivitas ϵ_r yang terlampaui tinggi antara dua dielektrik, pengendalian medan dengan penggunaan lapisan sebagian konduktif yang berfungsi sebagai pengontrol tegangan, dan banyak lainnya (Elektroindustrie, 2017).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan masalah yang telah dijelaskan pada latar belakang, penting untuk menganalisis faktor apa saja yang mempengaruhi peluahan parsial, maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi lokasi rongga udara terhadap nilai tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan parsial?
2. Bagaimana pengaruh variasi ketebalan isolasi terhadap nilai tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan parsial?
3. Bagaimana pengaruh bentuk elektroda/pola distribusi medan terhadap nilai tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan parsial?
4. Bagaimana pengaruh variasi tegangan bolak-balik terhadap karakteristik jumlah perulangan pulsa peluahan parsial?
5. Bagaimana pengaruh variasi lokasi rongga udara dan ketebalan isolasi terhadap nilai pelepasan muatan peluahan parsial?
6. Bagaimana pengaruh fenomena peluahan parsial terhadap penurunan kualitas bahan isolasi *Polivynil Chloride* (PVC)?

1.3 Batasan Masalah

Karena luasnya bahasan yang terdapat dalam penelitian *partial discharge*, maka ruang lingkup penelitian dibuat sebagai berikut:

1. Pengaruh homogenitas yang dimaksud dalam penelitian ini adalah variasi lokasi rongga udara, ketebalan bahan isolasi, dan bentuk elektroda terhadap distribusi medan listrik.
2. Karakteristik yang diamati adalah tegangan mula peluahan, tegangan pemadaman peluahan, jumlah perulangan pulsa peluahan, dan muatan peluahan.
3. Variasi ketebalan isolasi yang digunakan yaitu 2 mm, 2,5 mm, 3 mm, dan 3,5 mm.
4. Obyek uji yang digunakan dibentuk dari 3-4 lapisan *Polivynil Chloride* dengan ketebalan 0,5 mm dan 1 mm yang disusun hingga dicapai ketebalan tertentu.
5. Rongga udara yang memodelkan kecacatan pada bahan memiliki dimensi yang konstan untuk setiap variasi yaitu berbentuk silinder dengan tebal 0,5 mm dan diameter 1 cm.
6. Peluahan parsial yang terjadi diasumsikan tidak dipengaruhi oleh suhu, kelembapan, cahaya, dan tekanan dari luar.
7. Tidak dibahas lebih mendetail masalah alat dan komponen yang akan digunakan sebagai pengukuran.
8. Tidak membahas secara mendetail mengenai proses degradasi secara kimiawi yang disebabkan selama peluahan terjadi.

1.4 Tujuan

Dari penelitian ini dapat dianalisis pengaruh variasi posisi rongga udara, ketebalan isolasi, pengaruh bentuk elektroda, dan tegangan terhadap karakteristik peluahan parsial (*partial discharge*) pada bahan isolasi polimer yang digunakan serta mengetahui pengaruh fenomena peluahan parsial terhadap penurunan kualitas bahan isolasi yang digunakan.

1.5 Manfaat

Dari penelitian ini manfaat bagi institusi dapat menjadi tambahan landasan dalam menganalisis dan pengembangan lebih lanjut akan karakteristik peluahan parsial terhadap variabel yang diteliti. Manfaat bagi instansi dapat dijadikan landasan bagi proses pemeliharaan dan langkah preventif material isolasi di lapangan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Teori penunjang dalam penelitian diperlukan untuk mempermudah pemahaman tentang prinsip kerja, bahan, dan alat yang digunakan serta teori pendukung lainnya.

2.1 Isolasi Polimer pada Kabel

Berdasarkan standar PUIL 2011 isolator didefinisikan sebagai bahan yang mempunyai tahanan listrik yang besar agar mencegah terjadinya rambatan atau keocoran arus listrik antara hantaran yang berbeda atau dengan tanah. Selain fungsi itu isolator memiliki fungsi lain seperti menahan gaya mekanis akibat adanya rambatan arus yang mengalir pada konduktor serta menahan tekanan yang terjadi akibat medan listrik, gaya mekanik, termal, dan reaksi kimia yang terjadi secara serentak pada isolasi (Tobing, Teknik Pengujian Tegangan Tinggi, 2012). Karena pada kenyataannya sering terjadi kebocoran, maka harus dibatasi sampai sekecil-kecilnya agar tidak melebihi batas yang ditentukan oleh peraturan yang berlaku. Salah satu jenis media isolasi ini adalah media isolasi padat, isolasi padat mempunyai ketahanan yang amat besar dibandingkan dengan gas maupun cair, namun jika terjadi kegagalan maka akan sulit untuk kembali pada keadaan awalnya. Bahan isolasi padat banyak diaplikasikan pada kabel tegangan tinggi.

Isolator listrik di lapangan terkhusus di Indonesia saat ini adalah isolator yang terbuat dari bahan-bahan porselin maupun gelas. Pemakaian isolator jenis ini terkadang tidak cocok pada sistem transmisi listrik, hal ini dikarenakan semakin besarnya kebutuhan dan penerapan tegangan listrik pada sistem transmisi maka akan dibutuhkan bahan isolasi kaca atau porselin yang memiliki rapat massa (*density*) yang semakin besar tentu hal ini akan berdampak pada meningkatnya sisi ekonomis pembangunan menara transmisi. Tetapi sekarang mulai dikembangkan penggunaan bahan polimer. Bahan polimer mulai dilirik karena beberapa keunggulan yang dimilikinya. Penelitian mengenai karakteristik bahan polimer sebagai bahan isolator masih terus dilakukan.

Material polimer mulai dilirik untuk diaplikasikan sebagai material isolasi karena beberapa kelebihan yang dimiliki olehnya seperti:

- Ringan, massa jenis material polimer lebih rendah dibandingkan keramik maupun gelas, hal ini menyebabkan isolator polimer ringan, sehingga mudah dalam penanganan maupun instalasi.
- Baik digunakan pada daerah dengan tingkat polutan cukup tinggi, karena bahan polimer mempunyai sifat hidrofobik (menolak air) yang baik, sehingga air atau kotoran lainnya akan sukar menempel pada permukaannya, dengan sifat ketahanan terhadap polusi maka polimer mampu bertahan dalam lingkungan ekstrim yang memungkinkan terjadi korosi tingkat tinggi.
- Polimer sendiri memiliki karakteristik konduktivitas termal dan listrik yang cukup rendah sehingga cocok apabila digunakan sebagai bahan isolasi listrik untuk tegangan tinggi.
- Material polimer yang memiliki struktur yang fleksibel serta mudah dibentuk (Arora & Mosch, 2011).

Dibalik beberapa kelebihan yang dimiliki ada juga beberapa pertimbangan yang perlu diperhitungkan dalam menggunakan polimer sebagai material isolasi:

- Penuaan/degradasi pada permukaannya (*surface ageing*), stress yang disebabkan karena korona, radiasi UV atau zat kimia dapat menyebabkan reaksi pada permukaan polimer. Sehingga dapat merusak permukaan polimer (penuaan) yang dapat menghilangkan sifat hidrofobiknya.
- Dari sisi ekonomis harga polimer cenderung lebih tinggi, bahan penyusun polimer lebih mahal dibandingkan dengan porselin maupun gelas.
- Kekuatan mekaniknya kecil, isolasi polimer biasanya tidak mampu untuk menyokong dirinya sendiri. Oleh karenanya dalam instalasi dibutuhkan peralatan lain seperti jaket (*oversheath*) sebagai penyokongnya atau dengan tambahan material nano maupun mikro untuk menambah kemampuan mekanik bahan sehingga diperlukan biaya investasi lebih.

PVC tahan secara biologi dan kimia, membuatnya menjadi plastik yang dipilih sebagai bahan pembuat pipa pembuangan dalam rumah tangga dan pipa lainnya dimana korosi menjadi pembatas pipa logam. Dengan penambahan *plasticizer*, PVC menjadi cukup elastis untuk digunakan sebagai isolasi kabel. Namun jika terpapar api, kabel yang tertutup PVC akan menghasilkan asap HCl dan menjadi bahan yang berbahaya bagi kesehatan. PVC mudah ditemui dan juga memiliki harga yang relatif murah. Contoh

penggunaan PVC sebagai media isolasi pada kabel yang digunakan di lapangan diantaranya: kabel NYA (kabel berinti tunggal), NYM (kabel multi core dengan selubung dalam dan luar dari PVC), NYFGbY (kabel tanah dengan selubung PVC dilapis dengan selubung baja kemudian dilapis lagi dengan PVC terekstrusi), dan banyak aplikasi lainnya.

2.2 Peluahan Sebagian (*Partial Discharge*)

Jika ketahanan peluahan tembus pada sebagian sistem isolasi telah terlampaui maka tembus parsial ataupun tembus sempurna akan terjadi, bergantung pada apakah suatu kanal peluahan dengan resistansi yang rendah terbentuk antara elektroda atau tidak. Untuk kasus tembus parsial maka kondisi untuk peluahan yang menetap sering tidak terpenuhi karena masukan energi yang tidak cukup sehingga hanya akan dihasilkan suatu pulsa peluahan yang singkat. Jika dielektrik memiliki sifat dapat pulih sendiri dalam daerah dengan terpaan lebih, dan jika medan elektrik terbentuk kembali maka timbul peluahan parsial yang berbentuk pulsa. Peluahan parsial juga mungkin terjadi tanpa pulsa bilamana terjadi bersamaan dengan peluahan gas yang menetap. Peluahan parsial tanpa pulsa dan berbentuk pulsa dapat terjadi untuk semua jenis tegangan. *Partial discharge* pada sistem dapat diamati dengan melihat pulsa-pulsa singkat dengan frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi alamiah sistem (Kind, 1993).

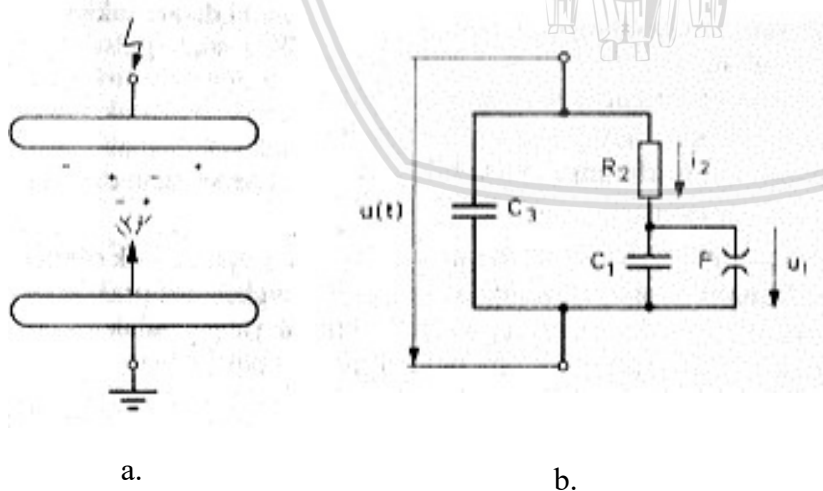
Akibat adanya tekanan listrik yang terus menerus maka akan terjadi penuaan isolasi dan dari cacat ini akan timbul kanal yang perlahan akan menjembatani kedua elektroda. Dua fenomena penuaan bahan yang paling sering dialami pada kabel tegangan tinggi berisolasi adalah erosi pada bahan dan *electrical treeing*. Jika *electrical treeing* ini menjembatani elektroda maka kegagalan isolasi akan terjadi. Ketika pulsa PD timbul, terdapat aliran elektron yang sangat cepat antara satu sisi rongga yang berisi gas ke sisi lainnya. PD ini merupakan busur api yang cukup kecil yang terjadi dalam sistem isolasi, karena itu menjadi makin buruknya isolasi dan sering kali menghasilkan kegagalan isolasi sempurna.

Mekanisme kegagalan pada bahan isolasi padat sendiri memiliki beberapa jenis proses meliputi kegagalan asasi (intrinsik), elektromekanik, *streamer*, *thermal*, erosi, *tracking* dan *treeing*. Kegagalan isolasi dapat dijelaskan dengan beberapa hal yang saling berkaitan dengan meningkatnya aktivitas muatan yang terdapat pada sistem isolasi yang dipengaruhi oleh banyak faktor, salah satu diantara sekian banyak penyebab kegagalan isolasi adalah ketidakmurnian yang pada bahan menjadi salah satu faktor penentu kegagalan. Ketidakmurnian menyebabkan ketidakseragaman distribusi medan dalam material isolasi yang digunakan, berangkat dari hal ini maka fenomena peluahan parsial dapat menjelaskan

bagaimana sistem dapat terjadi kegagalan sempurna akibat dari kecacatan yang ada di dalam bahan. Terjadinya partial discharge di dalam bahan isolasi dapat diujikan dan diamati dengan tiga metode yaitu: (1) pengukuran langsung arus pulsa, (2) alat ukur yang mendeteksi medan elektromagnetik hasil radiasi arus pulsa, yang disebut dengan pengujian tidak langsung, dan (3) pengukuran menggunakan jembatan setimbang (Tobing, 2012).

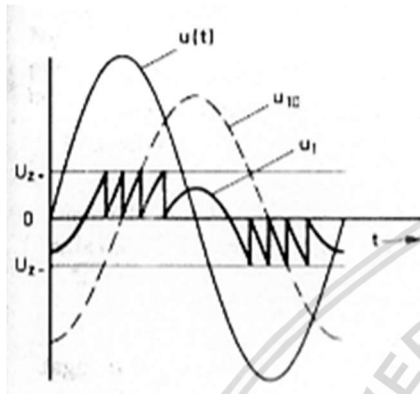
2.2.1 Peluahan Parsial Luar

Ionisasi tumbukan berlangsung dalam gas saat tegangan mula peluahan terlampaui pada elektroda yang runcing. Dalam medan yang sangat tidak homogen *avalanche* elektron dan *fotoionisasi* menghasilkan saluran tembus yang tidak sempurna, yang harus menyala kembali setelah setiap pemadaman peluahan parsial pada saat perpotongan tegangan (dalam hal tegangan bolak-balik). Gejala ini, disebut sebagai peluahan parsial luar atau peluahan korona, sangat penting terutama saluran transmisi tegangan tinggi karena peluahan ini memerlukan energi (rugi korona) dan pulsa arus yang dihasilkan membangkitkan gelombang elektromagnetik (interferensi radio). Peluahan parsial luar juga terjadi dalam rangkaian uji untuk pengujian tegangan tinggi yang tidak merusak, dan menghambat deteksi peluahan parsial dalam yang dapat membahayakan dielektrik. Peluahan parsial luar juga dapat terjadi dalam isolator cair atau pada perbatasan permukaan dari bahan isolasi padat, pada akhirnya gejala tersebut akan melemahkan isolasi yang dapat mengarah pada terjadinya tembus sempurna (Kind, 1993).

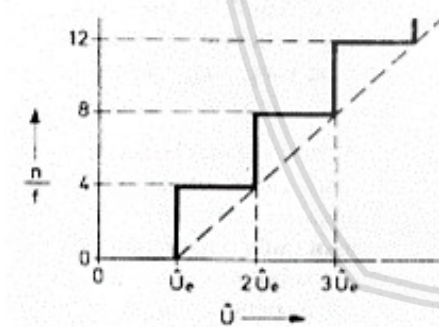


Gambar 2. 1. Susunan elektroda peluahan parsial luar dan rangkaian ekivalen : (a) susunan elektroda jarum-piring (b) rangkaian ekivalen korona.
Sumber : Kind (1993:p.72)

Memodelkan korona yang terjadi pada sistem dimisalkan dalam gambar 2.1 sebagai suatu konfigurasi elektroda piring jarum, sebagai suatu rangkaian dengan peluahan parsial luar maupun rangkaian ekivalen yang disederhanakan untuk peluahan parsial berbentuk pulsa . Nilai C1 menyatakan kapasitansi yang berkaitan dengan tembus ruang gas dan akan diluahkan bilamana tegangan nyala U_z dari sela F tercapai. Konduktivitas udara tertentu yang dinyatakan oleh R2 dalam rangkaian. Parameter C3 adalah kapasitansi parallel yang diberikan oleh susunan elektroda.



Gambar 2. 2. Kurva tegangan pada rangkaian ekivalen untuk pola peluahan parsial luar berbentuk pulsa
Sumber : Kind (1993:p.73)



Gambar 2. 3. Laju pengulangan pulsa peluahan parsial luar sebagai fungsi terpaan tegangan
Sumber : Kind (1993:p.73)

Dengan memberikan asumsi bahwa besarnya arus konduksi pada udara yang mengalir pada R2 lebih besar daripada nilai $1/\omega C1$, maka arus yang mengalir melalui R2 dapat dihitung yaitu:

$$i_2 = \frac{u(t)}{R_2} \dots \dots \dots (2-1)$$

Jika tegangan terapan pada elektroda dimisalkan sebagai:

$$u(t) = \hat{U} \sin \omega t \dots \dots \dots (2-2)$$

Maka besarnya tegangan yang terjadi pada peluahan luar pada C1 ialah:



$$u_{10} = \frac{\bar{U}}{\omega C_1 R_2} \sin (\omega t - \pi/2) \dots\dots\dots(2-3)$$

Jika nilai dari tegangan puncak uji mencapai suatu tegangan mula peluahan:

$$\widehat{U}_e = \omega C_1 R_2 U_Z \dots\dots\dots(2-4)$$

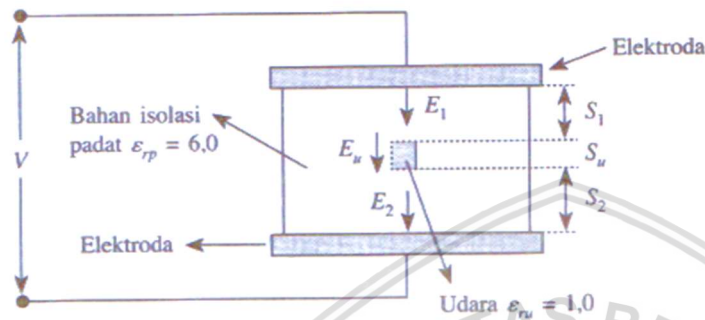
Jika tegangan nilai puncak dari tegangan uji mencapai tegangan mula peluahan maka tegangan nyala U_Z yang muncul pada F dan C1 akan diluahkan secara bersamaan, seperti yang dapat diamati pada gambar 2.2. Dengan meningkatnya tegangan uji $u(t)$, maka secara berurutan C1 akan dimuati kembali oleh tegangan yang menyerupai u_{10} hingga U_Z tercapai kembali, dan kejadian ini kembali berulang. Jika diamati pada gambar 2.3 seiring dengan meningkatnya nilai puncak tegangan uji maka laju pengulangan pulsa peluahan akan mengalami peningkatan. Pendekatan garis lurus yang digambarkan pada gambar 2.3 merupakan pendekatan yang baik untuk laju pengulangan pulsa tegangan tinggi peluahan, persamaan (2-5) memberikan pendekatan laju perulanga peluahan sebagai fungsi frekuensi, tegangan uji, dan tegangan mula peluahan (Kind, 1993).

$$n \approx 4f \frac{\bar{U} - \widehat{U}_e}{\widehat{U}_e} \dots\dots\dots(2-5)$$

2.2.2 Peluahan Parsial Dalam

Dalam bahan dielektrikum atau material isolasi, kegagalan material umum dikaitkan dengan fenomena terjadinya peluahan parsial yang terjadi. Peluahan yang terjadi di dalam bahan dapat disebabkan oleh banyak faktor, salah satunya kecacatan bahan isolasi karena ketidaksempurnaan pada proses fabrikasi, kecacatan yang terjadi di dalam material bahan dielektrikum maupun material isolasi padat ditemui berupa gas maupun bahan pengotor lainnya dimana nilai permitivitas pengotor dalam bahan bernilai lebih kecil jika dibandingkan dengan permitivitas dari bahan dielektrikum maupun isolasinya. Sebagai akibat perbedaan permitivitas antara dua bahan pada material isolasi atau dielektrik maka tekanan listrik yang terjadi pada bahan yang memiliki permitivitas bahan lebih rendah, tekanan elektrik yang dialami oleh gas atau bahan pengotor dalam bahan menjadi lebih besar dibandingkan tekanan elektrik yang terjadi pada material isolasi atau dielektrik. Kecacatan dalam bahan isolasi selain diakibatkan oleh proses fabrikasi dapat juga diakibatkan oleh beberapa faktor lainnya contoh pada material dielektrik polimer saat pada dikenai suhu cukup tinggi dengan rentang waktu tertentu maka akan terjadi reaksi kimia dalam bahan, reaksi kimia yang terjadi dapat memicu timbulnya uap maupun gas dalam bahan isolasi. Dari hal itulah dapat diambil suatu pernyataan bahwa adanya rongga atau pengotor, yang mungkin diakibatkan oleh reaksi kimia bahan karena beberapa faktor tertentu menjadi suatu

pemicu munculnya fenomena ini. Akibat adanya stress listrik yang terus menerus maka akan terjadi penuaan isolasi polimer dan dari cacat ini akan timbul degradasi pada material. Pada material isolasi padat proses kegagalan total pada bahan dapat dijelaskan dengan kegagalan erosi dan juga proses *electrical treeing* (pemohonan listrik) yang erat berhubungan dengan fenomena peluahan parsial.



Gambar 2. 4. Model rongga udara dalam media isolasi padat
Sumber : Tobing (2012:p.34)

Dalam praktiknya, tebal rongga udara pada material isolasi atau dielektrik S_u relatif sangat kecil dibandingkan dengan tebal bahan isolasi padat S_1 dan S_2 . Pada pemodelan sistem terjadinya peluahan parsial bahan, akan ditemui tiga lapisan bahan-bahan isolasi padat, rongga udara, bahan isolasi padat, sehingga jika kedua elektroda dimisalkan merupakan suatu elektroda pelat sejajar dengan luasan yang tak terhingga dan kedua elektroda ini dihubungkan kepada suatu sumber tegangan, kuat medan elektrik pada rongga udara dan bahan isolasi padat dapat didekati dengan menggunakan persamaan kuat medan elektrik pada material berlapis seperti berikut:

$$E = \frac{V}{\epsilon_n \left(\frac{S_1}{\epsilon_1} + \frac{S_2}{\epsilon_2} + \dots + \frac{S_n}{\epsilon_n} \right)} \dots \dots \dots (2-6)$$

dengan

V = beda tegangan antara dua elektroda (volt)

ϵ_n = permitivitas reaktif bahan isolasi ke-n, dan

S_n = tebal lapisan bahan isolasi ke-n (cm).

Jika dimisalkan permitivitas relatif bahan isolasi padat $\epsilon_{rp} = 6$ dan permitivitas relatif udara $\epsilon_{ru} = 1$, maka kuat medan elektrik pada rongga udara adalah

$$E_u = \frac{V}{1 \times \left(\frac{S_1}{6} + \frac{S_u}{1} + \frac{S_2}{6} \right)} = \frac{V}{1 \times \left(\frac{S_1 + S_2}{6} + \frac{S_u}{1} \right)} \dots \dots \dots (2-7)$$

Karena pada bahan isolasi rongga atau cacat yang terjadi pada bahan dielektrik atau isolasi dianggap sangat kecil jika dibandingkan dengan tebal bahan isolasi atau dielektrik keseluruhan bahan isolasi padat ($S_1 + S_2$), maka kuat medan elektrik pada rongga udara dapat ditulis sebagai

$$E_u = \frac{6V}{S_1 + S_2} \dots\dots\dots(2-8)$$

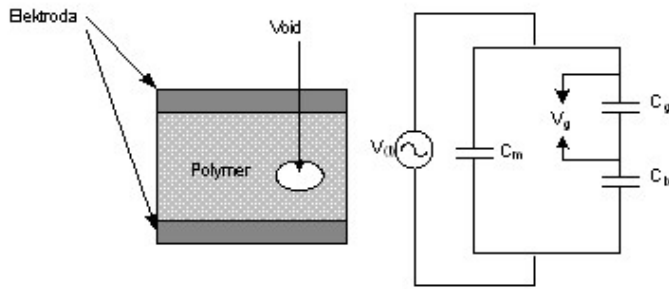
Dengan langkah yang sama, maka kita dapat menghitung besarnya medan elektrik yang terjadi pada bahan isolasi atau dielektrik padat seperti berikut

$$E_p = \frac{V}{6 \times (\frac{S_1}{6} + \frac{S_u}{1} + \frac{S_2}{6})} = \frac{V}{S_1 + S_2} \dots\dots\dots(2-9)$$

Jika kuat medan elektrik yang terjadi pada rongga udara dibandingkan terhadap kuat medan yang terjadi pada bahan isolasi atau dielektrik padat maka akan diperoleh

$$\frac{E_u}{E_p} = 6 \text{ atau } E_u = 6E_p \dots\dots\dots(2-10)$$

Jika kuat medan elektrik pada rongga udara melebihi kekuatan dielektrik dari udara, maka pada udara akan mengalami tembus listrik, sementara pada bahan isolasi padat tidak mengalami tembus listrik karena kekuatan dielektrik yang dimilikinya belum terlampaui. Oleh sebab itulah tembus pada bahan yang mengalami ketidakmurnian atau kecacatan mungkin karena adanya gas ataupun material lain yang memiliki permitivitas bahan lebih kecil daripada permitivitas bahan isolasi maka akan terjadi tembus secara sebagian pada bahan yang memiliki permitivitas lebih kecil tetapi belum mencapai tembus dimana antara dua elektroda terhubung. Terutama untuk tegangan bolak-balik dengan nilai amplitud yang mencukupi maka terjadi peluahan yang berbentuk pulsa di dalam rongga. Karena tembus yang terjadi hanya pada rongga udara, atau hanya sebagian dari keseluruhan sistem isolasi yang mengalami tembus listrik, peristiwa ini disebut dengan peluahan parsial (*partial discharge*) (Tobing, Teknik Pengujian Tegangan Tinggi, 2012). Dielektrik sekeliling dapat memburuk akibat pengaruh jangka panjang dari peluahan parsial ini, dan dengan kondisi tertentu bahkan dapat dirusakkan oleh tembus sempurna akibat mekanisme erosi.



Gambar 2. 5. Pemodelan void didalam bahan isolasi padat dalam rangkaian ekivalen listrik
Sumber : Kind (1993 :p.75)

Dalam gambar 2.5 dicontohkan suatu susunan elektroda dengan peluahan parsial dalam yang digambarkan dengan sistem isolasi dengan dielektrik padat yang mengandung rongga gas. *Void* diwakili dengan kapasitor C_g yang diparalel dengan sela percik, yang mengalami peluahan, yang terjadi ketika tegangan padanya melebihi tegangan insepisi U_z . Sementara kapasitansi isolasi yang berada pada posisi seri dengan *void* diwakili kapasitor C_b dan bagian isolasi selebihnya diwakili dengan kapasitor C_m . Jika tegangan uji lebih besar dari tegangan mula maka terjadi pemuatan C_g secara berulang. Nampak dalam gambar tersebut bahwa pulsa-pulsa peluahan parsial terjadi terutama dalam daerah perpotongan tegangan uji. Jika suatu tegangan AC dengan frekuensi f dan magnitudo $V(t)$ diterapkan pada isolasi, maka tegangan *void* $V_g(t)$ adalah:

$$V_g = \frac{C_b}{C_g + C_b} \times V(t) \dots\dots\dots (2-11)$$

Jika dimisalkan tegangan masukan bagi sistem isolasi yang diberikan oleh rangkaian ekivalen besarnya adalah:

$$V(t) = \hat{U} \sin \omega t \dots\dots\dots (2-12)$$

Maka besarnya tegangan yang terjadi pada rongga udara dapat kita nyatakan lebih lanjut sebagai :

$$V_g = \frac{C_b}{C_g + C_b} \times \hat{U} \sin \omega t \dots\dots\dots (2-13)$$

Nilai puncak tegangan saat terjadinya peluahan akan mencapai nilai tegangan mula U_e sewaktu nilai puncak dari tegangan hubung buka sama dengan U_z . Dengan demikian akan berlaku persamaan :

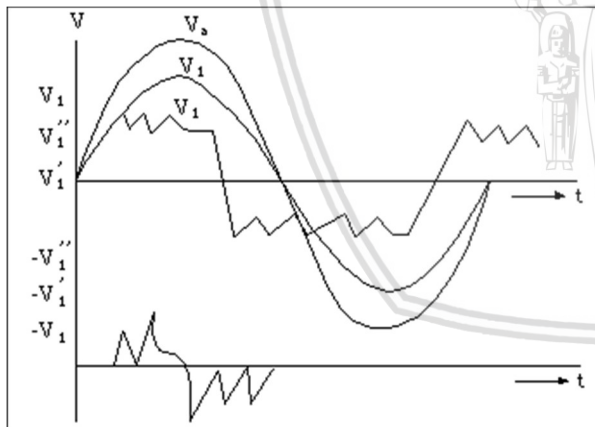
$$\hat{U}_e = \frac{C_g + C_b}{C_b} \times U_z \dots\dots\dots (2-14)$$

Jika tegangan bolak-balik $V(t)$ yang diterapkan tidak menghasilkan kegagalan, maka bentuk gelombang yang terjadi pada rongga adalah V_g . Tetapi jika tegangan V_g tersebut sudah cukup besar bagi rongga, maka akan terjadi peluahan pada V_s . Pada waktu terjadi

peluahan dengan tegangan V_s , maka pada rongga timbul busur api. Busur api yang terjadi, diiringi oleh jatuhnya tegangan sampai V_r dan mengalirnya arus $i(t)$. Busur api kemudian padam. Tegangan pada rongga kemudian naik lagi sampai terjadi kegagalan pada rongga berikutnya pada tegangan V_s . Hal ini juga terjadi pada setengah gelombang berikutnya yaitu yang negatif. Rongga akan meluahkan pada waktu tegangan *void* mencapai $-V_s$, pada waktu itu gas dalam rongga berada pada keadaan gagal. Akan tetapi walaupun tegangan pada rongga meningkat akan mencapai tegangan percik (*spark voltage*), bisa saja tidak terjadi peluahan sebagian, peluahan akan terjadi jika elektron pemicu *avalanche* tersedia untuk memulai peluahan sebagian. Hubungan antara fasa yang terjadi saat peluahan luar (korona) dengan terjadinya peluahan dalam pada material isolasi menjadi salah satu unsur pembeda antara kedua fenomena ini. Untuk mengukur karakteristik dari peluahan parsial dalam bahan dapat kita nyatakan sebagai perilaku muatan yang besarnya Q_1 , yang mana dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_1 = (C_g + C_b) U_z \dots \dots \dots (2-15)$$

Dalam praktiknya di lapangan akan sangat sulit untuk dapat menentukan seberapa besar muatan yang terjadi pada rongga udara, karena keterbatasan informasi yang berkaitan dengan besarnya kapasitansi yang ada pada rongga dari material isolasi (Kind, 1993).

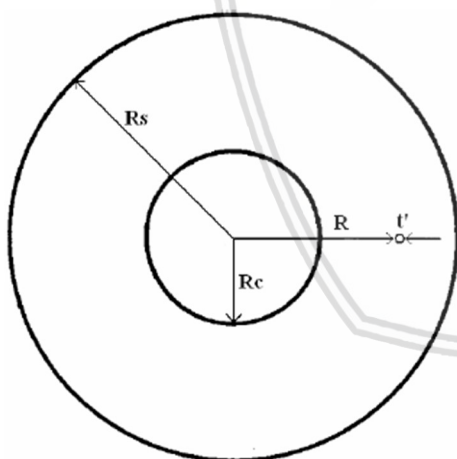


Gambar 2. 6. Pola peluahan parsial dalam pada material isolasi
Sumber : Arismunandar (1983:p.67)

Pada waktu gas dalam rongga gagal, permukaan zat isolasi padat merupakan anoda-katoda. Benturan-benturan elektron pada anoda akan mengakibatkan terlepasnya ikatan kimiawi zat padat. Demikian pula, pemboman katoda oleh ion-ion positif akan mengakibatkan rusaknya zat isolasi padat karena kenaikan suhu, yang kemudian mengakibatkan ketidakstabilan termal. Keadaan ini menyebabkan dinding zat padat lama-

kelamaan rusak, rongga menjadi semakin besar dan zat padat bertambah tipis (Arismunandar, 1983).

Tujuan yang menjadi poin penting dalam pengukuran peluahan parsial adalah menemukan pada nilai tegangan berapa peluahan mulai terjadi pada bahan dielektrik yang digunakan. Dalam mengestimasi besarnya tegangan mula peluahan (*partial discharge inception voltage*) pada kasus dimana pemuatan terjadi pada rongga di kabel tenaga, dengan kondisi suhu ruangan normal. Sebenarnya telah banyak percobaan yang dilakukan untuk menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik peluahan parsial, peluahan parsial dapat dipengaruhi oleh banyak parameter penentu, dari tipe pengotor dalam rongga, tekanan gas, karakteristik permukaan pada rongga, ukuran dan bentuk dari rongga, konstanta dielektrik disekitar rongga, dan banyak lainnya. Dalam percobaan mengestimasi besarnya tegangan mula peluahan pada referensi ini hanya berlaku terhadap beberapa kondisi agar pendekatan yang diberikan valid seperti tekanan berkisar antara 0.067 kPa hingga 101.333 kPa dan rongga divariasikan ketebalannya antara 0.001 cm hingga 11 cm. Perhitungan akan akurat hingga ketelitian $\pm 3.5\%$ dengan range pt' kisaran 0.0133-1400 kPa-cm.



Gambar 2. 7. Penampang melintang dari kabel koaksial
Sumber : M.U.Zuberi, dkk (2008 : p.346)

Rangkaian pada kabel berinti tunggal dari suatu konduktor dimisalkan memiliki jari-jari dalam isolasi sebesar R_c dan diameter luar dari isolasi R_s dengan ketebalan rongga yang diberikan t' yang berjarak R dari inti konduktor seperti pada gambar 2.7 Maka dapat kita rumuskan besarnya tegangan mulai pada rongga yang terjadi diberikan pada:

$$V_i = \frac{E_g R}{S} \left[\ln \left(\frac{R_s}{R_c} \right) \left(1 + \frac{t'}{R} \right)^{S-1} \right] \dots \dots \dots (2-16)$$

Pada persamaan di atas nilai dari E_g besarnya nilai kekuatan medan dielektrik dari gas yang ada di dalam rongga. Nilai dari S bergantung dari bentuk dari pada rongga yang terjadi. Untuk rongga yang berbentuk silinder yang memiliki rasio besar antara jari-jari dengan ketinggian dari rongga,

$$S = \epsilon_r \dots \dots \dots (2-17)$$

Sedangkan untuk model rongga dengan bentuk bola (*spherical*) maka S akan dinyatakan sebagai :

$$S = \frac{3\epsilon_r}{1+2\epsilon_r} \dots \dots \dots (2-18)$$

Dengan nilai ϵ_r adalah permitivitas dari bahan dielektrik yang digunakan sebagai objek uji (Zuberi, Masood, Khan, Husain, & Anwar, 2008).

2.3 Sinyal Masukan Alat Ukur Peluahan Parsial

Jika V_i merupakan besarnya tegangan sumber yang membuat terjadinya peluahan parsial pada objek uji, maka pada saat terjadinya peluahan parsial tersebut tegangan pada kapasitor C_1 dan C_2 masing-masing adalah

$$V_1 = \frac{C_2}{C_1+C_2} V_i \dots \dots \dots (2-19)$$

dan

$$V_2 = \frac{C_1}{C_1+C_2} V_i \dots \dots \dots (2-20)$$

Ketika terjadi peluahan parsial, C_1 akan membuang muatannya sehingga tegangan pada C_1 berkurang sebesar ΔV . Sebaliknya, tegangan C_2 akan naik sebesar ΔV hal ini ditujukan agar menjaga besarnya tegangan V_{ao} besarnya adalah tetap V_i . Tegangan C_2 naik sebesar ΔV jika ada muatan q dari C_1 mengisi C_2 . Maka besarnya muatan pada kapasitor C_2 adalah

$$q = C_2 \Delta V \dots \dots \dots (2-21)$$

Perpindahan muatan q ini dapat dideteksi alat ukur karena terjadi pada rangkaian luar dari objek uji atau pada penghubung objek uji dengan sumber tegangan. Perpindahan muatan q ini nantinya akan berhubungan dengan energy yang didisipasikan peluahan dan dimensi rongga tempat terjadinya peluahan tersebut (Tobing, Teknik Pengujian Tegangan Tinggi, 2012).

2.3.1 Hubungan q dengan Disipasi Energi

Energi yang tersimpan pada rongga atau kapasitansi C_1 adalah :

$$\text{Sebelum terjadi peluahan : } \frac{1}{2} C_b V_b^2$$

$$\text{Setelah terjadi peluahan : } \frac{1}{2} C_b (V_b - \Delta V)^2$$

Maka dari rumusan diatas didapatkan besarnya energy yang didisipasikan

$$W_d = \frac{1}{2} C_b (V_b^2 - (V_b - \Delta V)^2) = \frac{1}{2} C_b (2\Delta V V_b - (\Delta V)^2) \dots\dots\dots (2-22)$$

Dengan mengabaikan komponen $(\Delta V)^2$, dengan asumsi bahwa nilai tersebut yang amat kecil, dengan pengabaian nilai ini error yang ditimbulkan tak lebih dari 10% maka akan didapatkan suatu persamaan baru yang besarnya :

$$W_d = C_b \Delta V V_b \dots\dots\dots (2-23)$$

Dengan mensubstitusi nilai V_b pada persamaan diatas dengan nilai pembagian tegangan kapasitor, maka akan didapatkan persamaan baru yaitu:

$$W_d = \frac{C_b C_g \Delta V}{C_b + C_g} V_i \dots\dots\dots (2-24)$$

Dengan meninjau bahwa nilai dari tebal rongga yang kecil ΔS dibandingkan dengan tebal bahan isolasi padat, sedangkan nilai kapasitansi sendiri akan berbanding terbalik dengan tebal medium maka nilai C_b akan lebih besar dibandingkan dengan C_g sehingga $(C_b + C_g)$ dapat kita asumsikan nilainya akan mendekati nilai C_b dengan demikian didapat persamaan:

$$W_d = C_g \Delta V V_i = q V_i \dots\dots\dots (2-25)$$

Dari persamaan diatas diketahui bahwa nilai energi yang didisipasikan selama terjadinya peluahan besarnya akan sebanding dengan besaran q . Jika ada dua objek uji yang memiliki nilai tegangan mula V_i yang sama, ketika terjadi peluahan parsial pada objek uji perbandingan antara muatan q di kedua objek dan besarnya nilai perbandingan energy yang didisipasikan objek uji akan sama besar (Tobing, 2012).

2.3.2 Hubungan q dengan Dimensi Rongga

Dalam hal ini, rongga udara kita misalkan memiliki betuk silinder tertutup yang berdiri tegak, dengan luas penutupnya A_r dan tingginya sebesar ΔS . Jika ϵ_p adalah permitivitas relatif bahan isolasi padat, maka nilai C_g dapat dituliskan sebagai berikut:

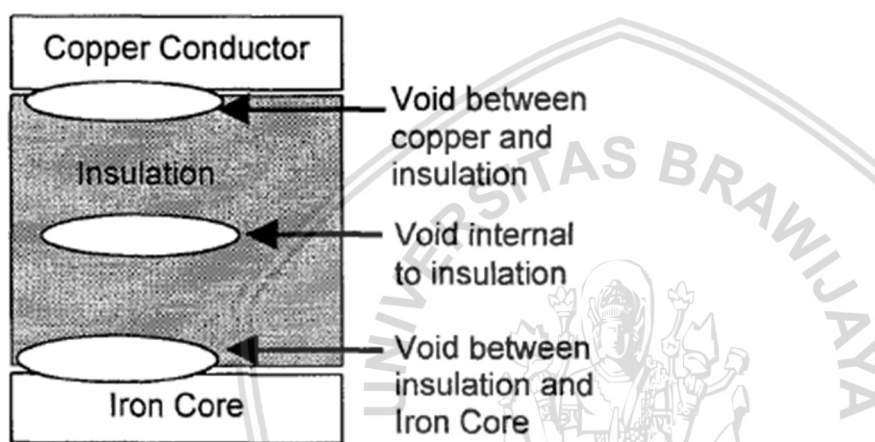
$$C_g = \frac{\epsilon_0 \epsilon_p A_r}{(S - \Delta S)} \dots\dots\dots (2-26)$$

Jika nilai C_2 pada persamaan di atas disubstitusikan dari persamaan $q = C_2 \Delta V$ akan diperoleh:

$$q = \frac{\epsilon_0 \epsilon_p A_r}{(S - \Delta S)} \Delta V \dots \dots \dots (2-27)$$

Jika tinggi rongga Δs besar, suku $(S - \Delta S)$ makin kecil. Karena jarak tutup atas dengan tutup bawah rongga semakin besar, maka panjang sela udara dalam rongga juga semakin besar. Pengurangan pembagi $(S - \Delta S)$ dan kenaikan ΔV membuat nilai q naik secara signifikan. Jika diameter rongga bertambah, nilai A_r semakin besar, maka nilai q akan semakin besar. Dengan perkataan lain, dimensi rongga udara dapat diperkirakan dengan menghitung besarnya nilai q (Tobing, 2012).

2.4 Aplikasi Peluahan Parsial pada Sistem Tenaga Listrik

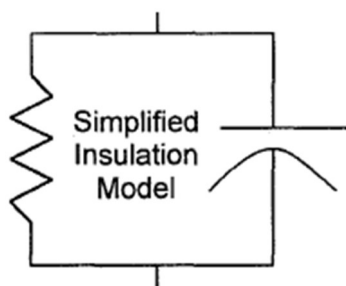


Gambar 2. 8. Kemungkinan tempat ditemukannya rongga pada system tenaga
Sumber : Gabe dan Alex (1999 : p.124)

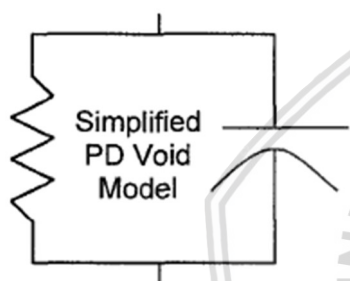
Dalam pembahasan ini akan dibahas 3 lokasi yang berbeda dari terjadinya rongga pada sistem, pada gambar 2.8 digambarkan 3 lokasi umum dimana terbentuknya rongga pada media isolasi atau dielektrik. Dari lokasi ditemukannya kecacatan pada bahan rongga dapat terjadi pada (1) perbatasan antara konduktor fasa dan dielektrik, (2) di dalam bahan dielektrik, dan (3) perbatasan antara dielektrik dan konduktor netral sistem.

Dalam memodelkan dielektrik maupun rongga sebagai suatu rangkaian listrik sebenarnya tidak memiliki perbedaan spesifik secara model rangkaian listrik, pemodelan mewakili arus bocor dapat terjadi di dalam bahan dielektrik dimana arus akan memecah dalam dua jalur yaitu yg mengalir pada bagian resistif dan juga bagian kapasitif. Dalam gambar 2.9 dan 2.10 diperlihatkan rangkaian pengganti sebagai model dari isolasi dan juga rongga udara pada sistem. Terjadinya peluahan dalam material mampu menyebabkan pelemahan amplitudo sinyal elektrik, nantinya dari penunjukan grafik pelemahan sinyal yang teramati diharapkan analisa terhadap terjadinya peluahan dalam bahan dapat diamati sebagai langkah penentuan

perilaku maupun tindakan preventif seperti apa yang harus dilakukan dan diantisipasi agar kegagalan pada bahan dielektrik mampu dicegah sedini mungkin.



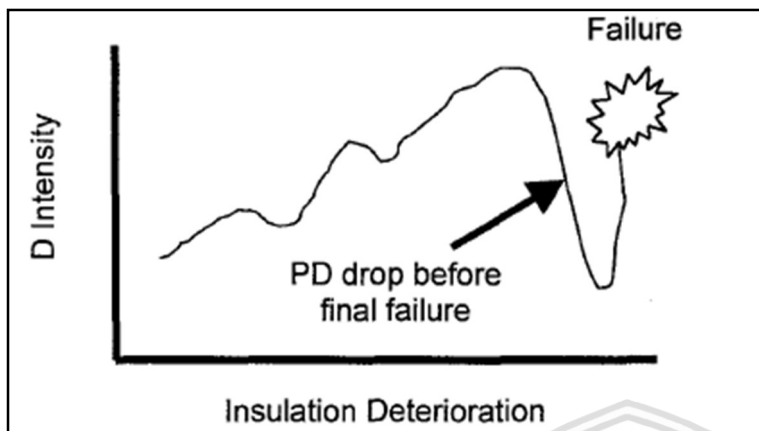
Gambar 2. 9. Model isolasi dan pelemahan sinyal elektrik yang terjadi dalam bahan
Sumber : Gabe dan Alex (1999 : p.125)



Gambar 2. 10. Model rongga udara dan pelemahan sinyal elektrik yang terjadi dalam bahan
Sumber : Gabe dan Alex (1999 : p.126)

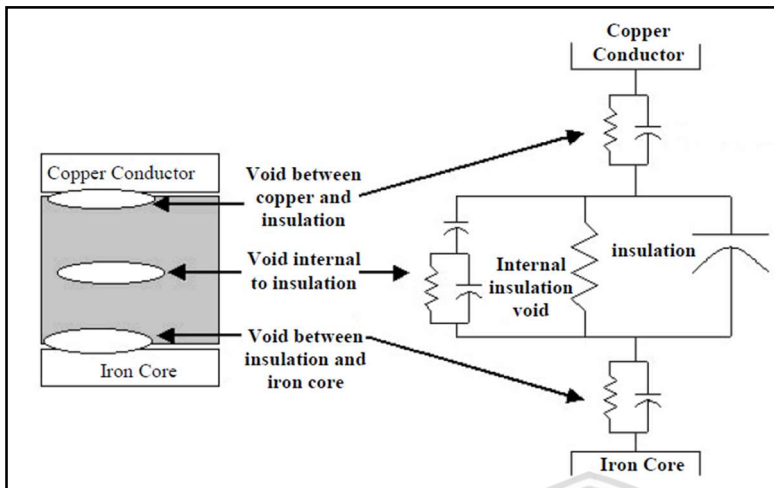
Peluhan yang terjadi di dalam material akan mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan waktu terpa medan elektrik. Peluhan lebih lanjut dan mendekati kegagalan sempurna dari bahan akan ditunjukkan dengan penurunan yang cukup drastis dari medan yang diamati melalui pengukuran. Hal ini terjadi sebagai akibat busur internal telah mengalami karbonisasi lanjut dimana komponen resistif yang dimodelkan mencapai nilai terendahnya sehingga tegangan yang terjadi pada void kecil untuk memulai terjadinya peluhan. Dengan pengamatan penurunan nilai medan yang terjadi pada rongga, informasi yang kita dapatkan adalah peluhan yang terjadi didalam bahan telah mencapai nilai kritis dimana kemungkinan terjadinya kegagalan total menjadi semakin besar. Saat medan menjadi semakin kecil, arus yang melalui rongga menjadi lebih besar, hal ini menyebabkan pemanasan lokal pada rongga akibat terjadinya busur api. Pemanasan yang cukup besar akibat busur api cukup efisien untuk memulai terjadinya kegagalan secara molekuler dan kimiawi pada bahan. Saat medan mulai melemah dan kemudian mengalami kenaikan kembali pada wilayah inilah kemungkinan kegagalan total terjadi menyeluruh sehingga isolasi tak dapat lagi bekerja

sebagaimana seharusnya. Pada gambar 2.11 di ilustrasikan tahap-tahap terjadinya peluahan hingga kegagalan total pada sistem terjadi.



Gambar 2. 11. Grafik peluahan parsial terhadap waktu kegagalan isolasi sistem
Sumber : Gabe dan Alex (1999 : p.126)

Model kapasitif pada rongga mewakili besarnya muatan yang harus dilampaui agar peluahan dapat terjadi. Tingkat muatan tertentu perlu ada karena tegangan pada rongga yang diwakili dengan kapasitor tidak mampu berubah secara tiba-tiba. Peluahan parsial, yang dihitung sebagai gelombang dengan frekuensi tinggi memiliki amplitude yang dapat dikatakan sukar diamati oleh osiloskop biasa karena memiliki rentang yang kecil berkisar antara beberapa millivolt hingga beberapa volt saja. Pada pengukurannya terdapat dua hal yang mampu kita amati dari fenomena ini, yang pertama adalah besarnya tegangan maksimum dan rata-rata yang direpresentasikan dalam satuan millivolts ataupun volt, kemudian yang kedua terdapat pengulangan pulsa yang di representasikan sebagai banyaknya kejadian peluahan parsial selama setengah periode baik positif maupun negatif. Jika dikaitkan keduanya untuk mengetahui kondisi isolasi selama pengujian. Besarnya nilai muatan maupun tegangan dikaitkan terhadap tingkat kerusakan yang terjadi pada material atau banyaknya kerusakan/cacat yang terjadi. Sedangkan jumlah pulsa pengulangan yang terjadi selama satu siklus atau setengah siklus gelombang menggambarkan banyaknya pelepasan muatan yang terjadi pada variasi tegangan maksimum. Kedua hal ini menjadi pertimbangan yang amat penting karena mampu memberikan sejumlah informasi mengenai sejauh mana dan seberapa besar kecacatan yang ada di dalam material. Analisa kita akan dibatasi pada rentang satu siklus gelombang penuh, untuk memastikan akar dari terjadinya peristiwa ini, dalam arti menentukan dimanakah letak dari kecacatan yang terdapat dalam material (Paoletti & Golubev, 1999).

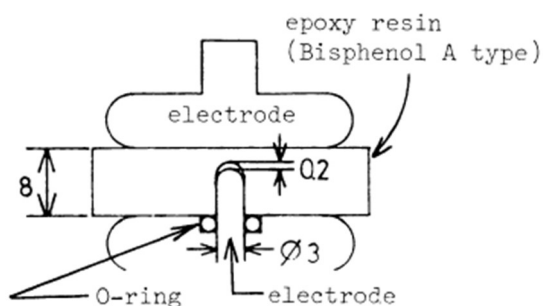


Gambar 2. 12. Ilustrasi kecacatan dan rangkaian ekuivalen total material secara elektrik
Sumber : Gabe dan Alex (1999 : p.127)

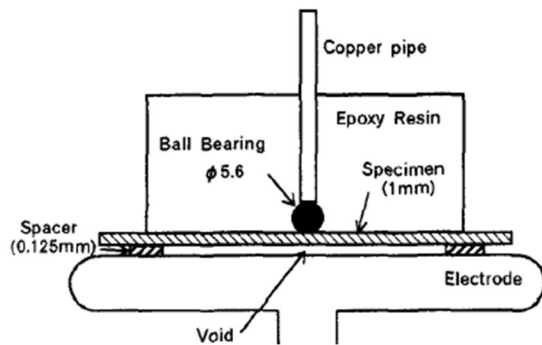
2.5 Alat-alat Pendukung Pengujian *Partial Discharge*

2.5.1 Elektroda CIGRE Metode II

Dalam pengujian ini salah satu elektroda yang akan digunakan adalah elektroda standar dari CIGRE yang menjadi standar uji pengukuran dari peluahan parsial. Metode yang digunakan ini merupakan perkembangan dari metode sebelumnya dimana letak dari rongga dikonsentrasikan pada satu titik tertentu dengan dimensi void yang dapat diujikan berdimensi 100 kali dibandingkan dengan metode sebelumnya. Dapat dilihat bahwa untuk elektroda tegangan tinggi yang berada di atas sampel memiliki bentuk bola yang nantinya akan dilapisi dengan epoxy resin, kemudian untuk elektroda bagian bawah menggunakan elektroda piring hal ini memiliki tujuan untuk memastikan medan yang terjadi pada rongga udara tidak homogen. Nantinya elektroda akan dilengkapi dengan *clamp* sehingga dapat dipasang dan dilepas selama pengujian, tujuannya juga untuk membantu menekan objek uji sehingga rongga udara yang dibentuk sesuai, tidak ada bagian objek uji yang mengisi rongga udara (Ishida, Nagao, & Kosaki, 1998).



Gambar 2. 13. Konfigurasi elektrode CIGRE metode 1
Sumber : Izeki, Noboru dan Tatsuta, Fujio (1984:p.327)



Gambar 2. 14. Konfigurasi elektrode CIGRE metode 2

Sumber : Ishida, Takahiro, Nagao, Masayuki, dan Kosaki, Masamitsu (1993:p.205)

2.5.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM (*Scanning Electron Microscope*) adalah alat untuk melihat benda yang tak terlihat/kasat mata dari ukuran mikroskop ($1 \mu m = 10^{-6}m$) hingga *nanospace* ($1 nm = 10^{-9}m$). Dengan menggunakan sinar elektron terfokus, SEM dapat memeperlihatkan secara detail dan kompleks struktur dan ketebalan suatu benda yang dapat diakses dengan mikroskop cahaya. SEM dapat memperbesar objek dari sekitar 10 kali hingga 300.000 kali.

Pada dasarnya, prinsip kerja SEM “melihat” suatu benda sama seperti ketika seseorang yang berada pada ruang gelap menggunakan obor untuk memindai objek pada sebuah dinding. SEM menggunakan berkas elektron sebagai obor, detektor elektron sebagai mata, dan layar tampilan dan kamera sebagai memori.

SEM menyediakan fasilitas yang lebih dengan keuntungan melebihi mikroskop cahaya (LM) di tiga bidang utama:

1. Resolusi pada perbesaran yang tinggi.
2. *Depth of field*/topografi.
3. Mikroanalisis.

Pada penelitian ini digunakan *SEM Phenom G2 Pro* pada laboratorium Sentral Mesin Universitas Brawijaya, seperti yang terlihat pada Gambar 2.15.



(a)

(b)

Gambar 2. 15.(a) Scanning Electron Microscope (b) Display *SEM*
 Sumber: Lab. Sentral Teknik Mesin UB.

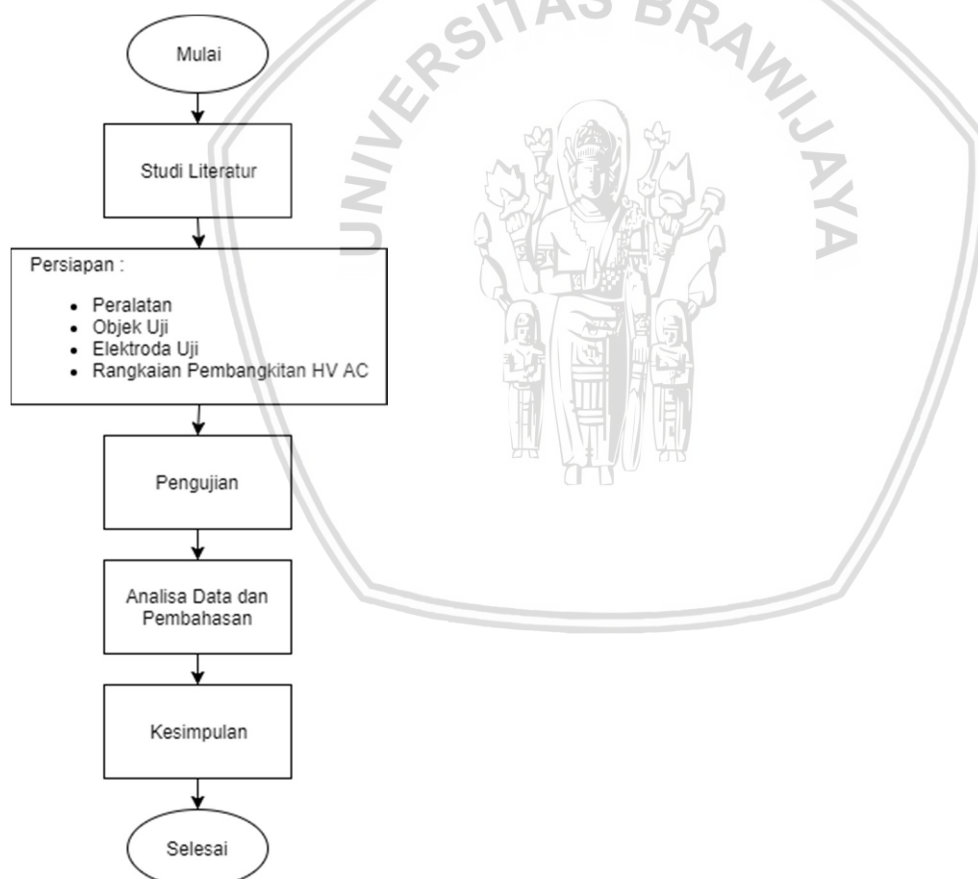




BAB III

METODE PENELITIAN

Bab ini berisi tentang metode dan langkah kerja untuk mengetahui karakteristik dari peluahan parsial (*partial discharge*) pada rongga udara dalam bahan isolasi polimer *Polivynil Chloride* (PVC) dengan mengamati pengaruh dari variasi lokasi rongga udara (*void*), ketebalan isolasi, bentuk elektroda, dan variasi tegangan bolak-balik terhadap karakteristik pulsa peluahan parsial. Adapun metode penelitian yang digunakan terdiri dari studi literatur, persiapan alat uji, persiapan objek uji, pengujian objek uji, pengambilan data dan analisis data, serta pengambilan kesimpulan. Langkah-langkah percobaan penelitian dapat ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1. Diagram alir analisis penelitian

3.1 Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk memahami konsep-konsep yang berkaitan dengan permasalahan yang akan dikaji dalam skripsi ini. Studi literatur ini dilakukan dengan mempelajari buku referensi, jurnal, skripsi, *web browsing* dan forum-forum resmi yang

menunjang dalam penyusunan skripsi yaitu mengenai karakteristik peluahan parsial dalam dari beberapa media isolasi yang digunakan, karakteristik peluahan parsial dengan variasi variable pengujian (seperti kelembapan, suhu, dimensi dan bentuk rongga, dsb), serta pengaruh perlakuan pada media isolasi terhadap jumlah dan amplitude dari peluahan parsial dalam, karakteristik peluahan parsial dalam pada tegangan AC, dan metode pengukuran pulsa peluahan parsial.

3.2 Persiapan

3.2.1 Persiapan Alat dan Fungsinya

Adapun peralatan yang digunakan di dalam penelitian ini agar mendapatkan hasil untuk menjawab rumusan masalahnya adalah sebagai berikut:

- a. Polivynil Chloride: Obyek uji
- b. Trafo uji : 220 V/ 100 kV, 5 kVA, 50 Hz
- c. C_k : Kapasitor kopling 100 pF
- d. R_e : Resistor pengukuran 10 M Ω
- e. Bola-Piring : Susunan elektroda bola-piring dengan metode II CIGRE
- f. Piring-Piring : Susunan elektroda homogen
- g. DSM : Alat ukur tegangan tinggi AC
- h. Osiloskop : Alat ukur sebagai penganalisa gelombang tegangan
- i. Kain Halus : Sebagai lap
- j. Sela bola : Sebagai komponen pengaman dan parameter saat tembus terjadi pada obyek
- k. RC Detector : Sebagai integrator pulsa arus *partial discharge*

Berikut masing-masing fungsi peralatan yang digunakan di dalam pengujian:

- a. Polivynil Chloride, sebagai objek uji yang akan diteliti.
- b. *HV Transformer* (Trafo uji), trafo ini dapat menaikkan tegangan sampai 100 kV, dengan daya yang dikeluarkan sebesar 5 kVA, dan frekuensi yang digunakan sesuai standar PLN, yaitu 50 Hz.
- c. C_k merupakan kapasitor pengukuran yang berfungsi sebagai penstabil tegangan pada saat hubung singkat terjadi pada objek uji dan pelindung meja kontrol (*control desk*).
- d. R_e merupakan pengaman agar arus yang mengalir tidak terlalu besar.
- e. Bola-piring digunakan sebagai elektroda uji non homogen dengan menggunakan metode II CIGRE yang dirancang sebagai keperluan analisa perilaku *partial discharge* pada bahan isolasi.

- f. Piring-piring digunakan sebagai elektroda uji dengan distribusi medan homogen sebagai keperluan analisa perilaku *partial discharge* pada bahan isolasi.
- g. DSM merupakan alat ukur yang berada di *control desk*, dan fungsi dari DSM adalah sebagai pengukur tegangan tinggi AC.
- h. Osiloskop, berguna untuk menampilkan bentuk pulsa arus yang sampai ke *ground* sehingga dapat diketahui besarnya tegangan *partial discharge*.
- i. Kain halus, digunakan sebagai pengering sehingga tidak ada debu yang menempel pada elektroda dan obyek uji sehingga tidak mempengaruhi validitas data.
- j. Sela bola, digunakan sebagai komponen pengaman dan parameter dari adanya tegangan lebih yang mampu merusak osiloskop apabila tembus terjadi pada obyek uji.
- k. RC detector, digunakan sebagai rangkaian integrator pulsa arus *partial discharge* untuk diubah menjadi tegangan sebagai input bagi osiloskop.

3.2.2 Persiapan Objek Uji

Obyek uji merupakan bahan isolasi yang berada di antara dua elektroda yang menghasilkan distribusi medan elektrik dan distribusi tegangan yang hampir sama dengan distribusi medan elektrik dan distribusi tegangan pada objek uji yang sesungguhnya. Objek uji yang digunakan pada penelitian adalah *Polivynil Chloride* (PVC) dengan variasi lokasi rongga, ketebalan isolasi, dan bentuk elektroda dalam isolasi, pada pengujian dari pengaruh variasi lokasi rongga udara terhadap karakteristik pulsa peluahan pada siklus positif dan negatif, rongga memiliki dimensi yang konstan dengan diameter dan ketebalan yang sama, tetapi lokasi dari rongga akan divariasikan pada (a) dekat elektroda bola dengan dua titik berbeda (tengah dan pinggir), (b) tepat dilapisan tengah antara dua isolasi PVC dengan dua titik berbeda (tengah dan pinggir), dan (c) dekat dengan elektroda piring dengan dua titik berbeda (tengah dan pinggir).

3.2.3 Persiapan Elektroda Uji

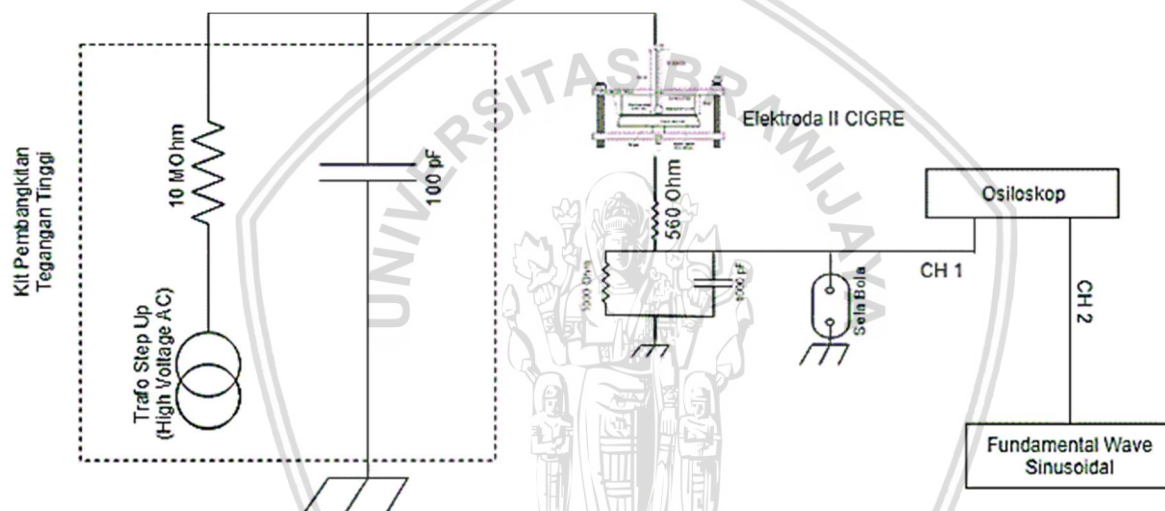
Elektroda yang digunakan di dalam penelitian ini terbuat dari stainless steel yang berupa elektroda bola-piring dan piring-piring, dimana pada elektroda bola memiliki diameter 5,6 mm yang akan dicetak dalam resin padat dengan diameter 60 mm sedangkan elektroda piring yang memiliki diameter terluar 60 mm.

3.2.4 Persiapan Rangkaian Pembangkitan Tegangan Tinggi AC

Rangkaian pembangkitan dan pengukuran tegangan tinggi AC digunakan untuk mengetahui karakteristik peluahan parsial (*partial discharge*) dibawah tekanan listrik AC,

akan diamati pengaruh sebaran, jumlah, dan amplitude dari partial discharge dengan memberikan tegangan listrik yang bervariasi, rangkaian pengujian seperti yang dapat dilihat seperti gambar 3.2 dibawah.

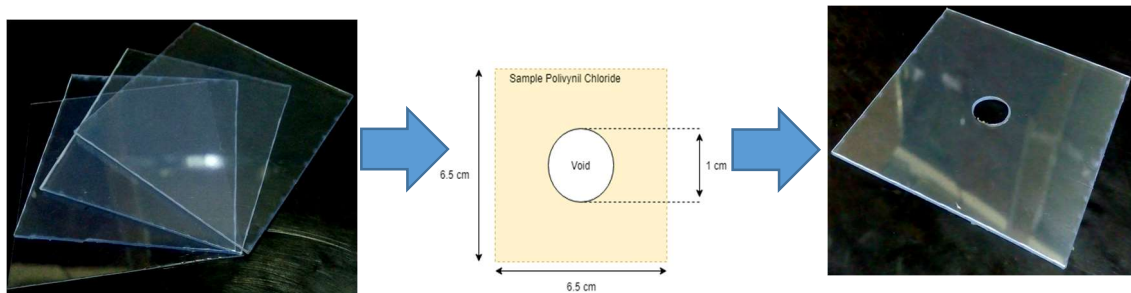
Pada gambar 3.2 rangkaian menunjukkan trafo uji dihubungkan paralel dengan C_k (kapasitor kopling) untuk dapat diukur tegangannya. Tegangan ukurnya diukur menggunakan *control desk* yang digunakan kabel penghubung DSM pada *control desk*, elektroda dihubungkan secara paralel dengan kapasitor kopling sebesar 100 pF. Dimana sisi elektroda bola akan dihubungkan dengan kabel fasa sedangkan elektroda piring akan dihubungkan dengan rangkaian elektronik, rangkaian elektronik disini akan terdiri atas komponen RC detector (ditunjukkan oleh resistor 1000 ohm yang diparalelkan dengan kapasitor 1000 pF) yang nantinya akan menjadi masukan bagi osiloskop.



Gambar 3. 2. Rangkaian pengujian pembangkitan tegangan tinggi AC

3.3 Mekanisme Pengujian Obyek Uji

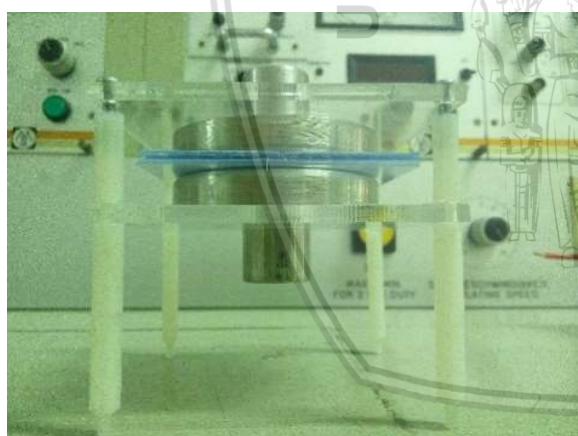
Dalam penelitian skripsi ini menggunakan isolasi polimer yang belum pernah dipakai (baru). Sample yang digunakan adalah *Polivynil Chloride* (PVC) yang dimensi dan bahan dan susunan elektrodanya ditunjukkan seperti gambar berikut.



Gambar 3. 3. Obyek uji PVC dengan rongga udara sebagai model kecacatan dalam bahan



Gambar 3. 4. Konfigurasi elektroda II CIGRE



Gambar 3. 5. Konfigurasi elektroda piring-piring

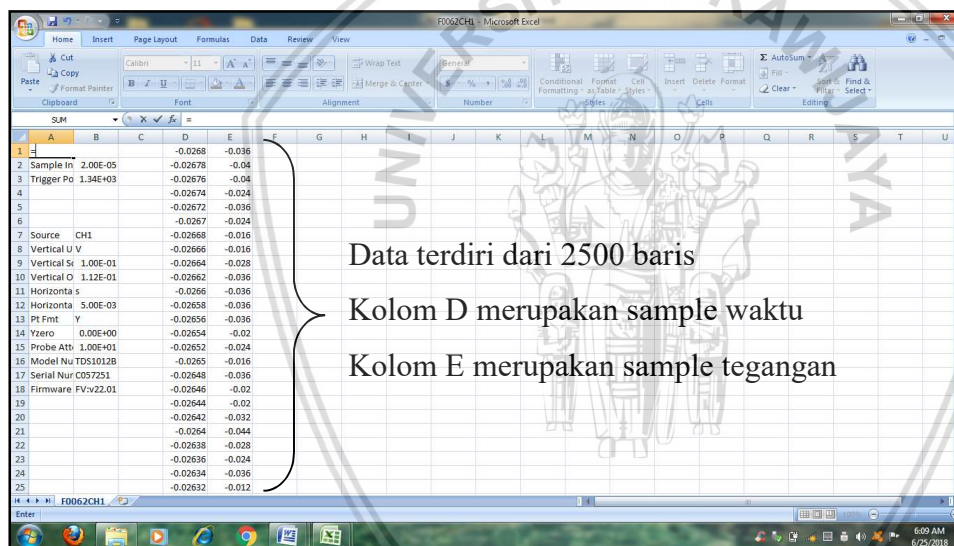
Sample rongga udara (*void*) dalam PVC dibuat dengan menumpuk 3-4 lapisan PVC sejenis dengan ketebalan 0,5 mm dan 1 mm yang divariasikan dimana salah satu lapisan dilubangi pada bagian tengah dan pinggir berdiameter 1 cm dan ketebalan 0,5 mm yang akan buat sendiri.

Dalam pengukurannya, elektroda bola sebagai fasa ditempatkan tepat pada bagian tengah dari susunan PVC dan elektroda piring sebagai *ground*. Untuk mencegah agar ketiga lembaran PVC tidak bergeser selama pengukuran dan membentuk ruang rongga (*void*)

tertutup maka sample PVC dijepit dengan kedua elektroda melalui mur dan baut yang ada pada *holder*.

3.4 Mekanisme Pengujian dan Pengolahan Data

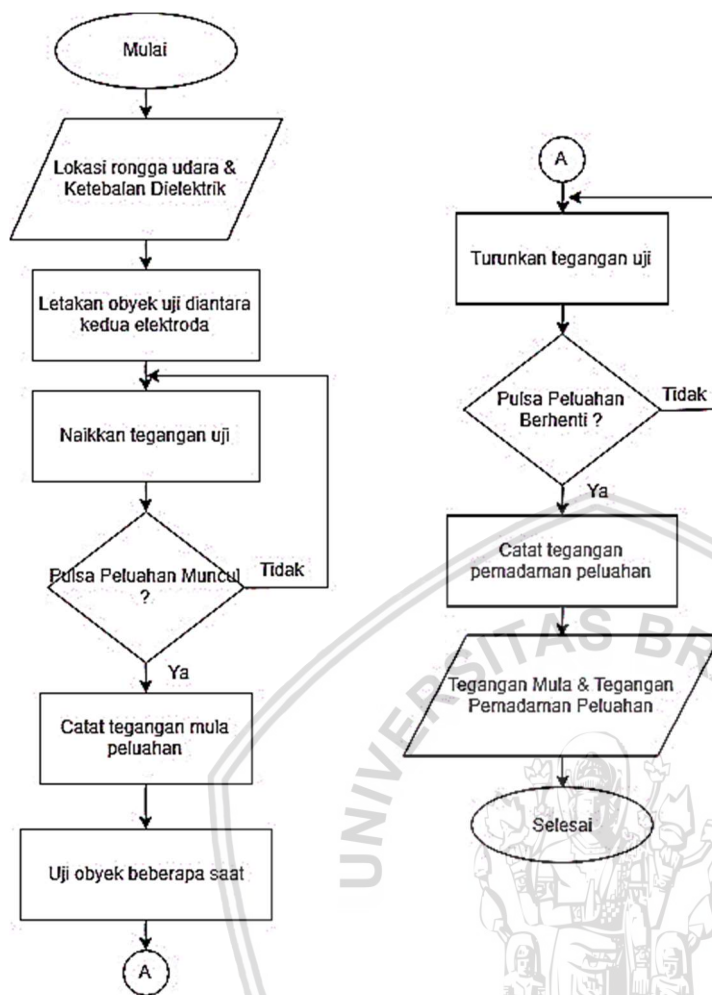
Pengukuran PD pada penelitian ini, menggunakan elektroda II CIGRE dan elektroda piring-piring sebagai pembandingnya, elektroda akan dihubungkan dengan sumber tegangan tinggi AC (50 Hz). Peluahan yang terjadi akan dideteksi dengan perangkat elektronik RC sebagai integrator arus sebelum diteruskan ke osiloskop. Rangkaian elektronik RC akan dihubungkan dengan *Channel 2* dan sumber tegangan AC akan dihubungkan dengan *Channel 1*. Dengan bantuan USB data yang terekam pada osiloskop akan disimpan dan diolah dengan bantuan perangkat *Microsoft excel* untuk menunjukkan pengukuran pulsa peluahan yang diamati pada osiloskop. Data yang tersimpan bersektensi .CSV, .JPG, dan .SET, data yang diolah dengan bantuan excel adalah data bersektensi .CSV.



Gambar 3. 6. Data hasil pengukuran osiloskop berupa ekstensi file CSV

3.5 Pengujian Variasi Lokasi Rongga Udara dan Ketebalan Dielektrik terhadap Tegangan Mula dan Tegangan Pemadaman Peluahan Parsial (*Partial Discharge*)

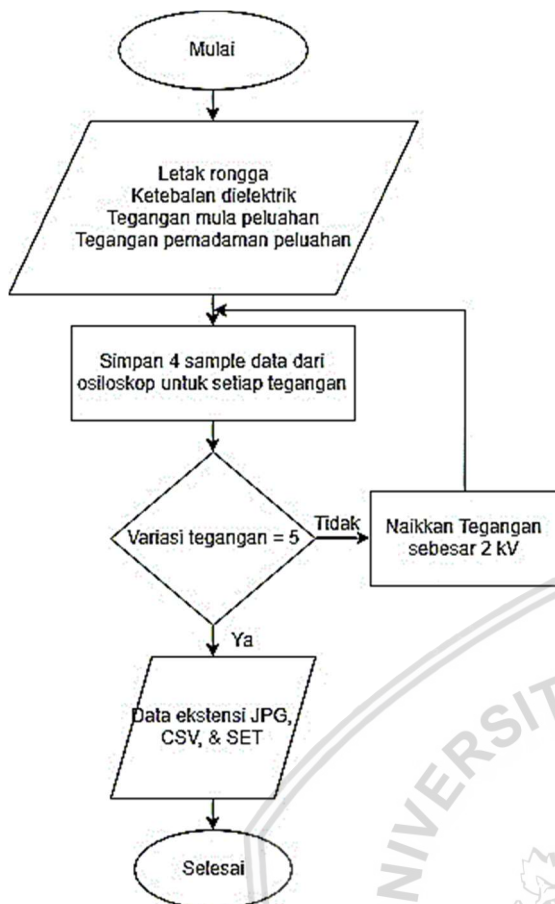
Pada pengukuran peluahan parsial yang menjadi tujuan utama dari pengukuran adalah menentukan nilai tegangan yang membuat obyek uji mengalami peluahan parsial. Tegangan ini disebut tegangan mula peluahan, setelah terjadi peluahan beberapa saat tegangan akan diturunkan dan diukur pada tegangan berapa peluahan parsial itu berhenti, tegangan ini dinamakan tegangan pemadaman peluahan parsial. Bagan penelitian untuk mengukur tegangan mula peluahan dan tegangan pemadaman dengan variasi lokasi rongga dan ketebalan isolasi ditunjukkan pada gambar 3.7 berikut.



Gambar 3. 7. Diagram pengujian tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan terhadap variasi lokasi rongga dan ketebalan isolasi

3.6 Pengujian Variasi Tegangan terhadap Karakteristik Jumlah Pulsa dan Muatan Peluahan Parsial

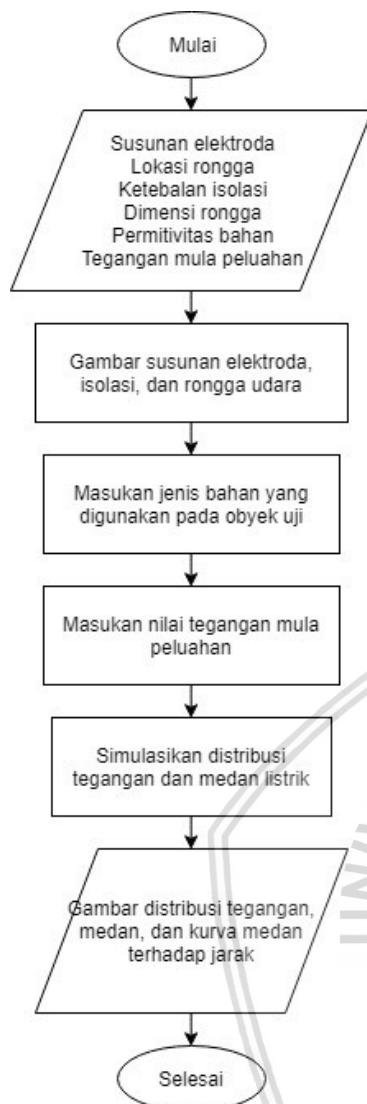
Pada pengujian variasi tegangan terhadap karakteristik peluahan parsial (jumlah perulangan pulsa dan muatan peluahan parsial) akan dilakukan dengan bantuan perangkat Microsoft Excel sebagai pengolah data pengukuran oleh osiloskop, adapun metode penelitian pengujian tugas akhir ini ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3. 8. Diagram pengukuran variasi tegangan bolak-balik terhadap karakteristik perulangan pulsa dan muatan peluahan parsial

3.7 Simulasi Distribusi Medan Listrik pada Pengujian Isolasi Polivynil Chloride

Distribusi medan listrik dari susunan elektroda metode II CIGRE dan elektroda piring piring pada pengujian karakteristik peluahan parsial (*partial discharge*) dapat disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2, dimana tujuan simulasi adalah menggambarkan pola distribusi medan listrik pada tegangan mula peluahan dalam bahan isolasi dengan beberapa variasi pada parameter material. Untuk simulasi FEMM dibutuhkan data-data berupa dimensi elektroda bola dan piring, dimensi rongga udara, ketebalan isolasi, permitivitas dielektrik, lokasi rongga udara, dan tegangan mula yang menyebabkan bahan meluahkan. Diagram alir langkah penggunaan FEMM 4.2 ditunjukkan pada gambar 3.9.



Gambar 3. 9. Diagram alir simulasi medan listrik pada obyek uji *Poliyynil Chloride* dengan software FEMM 4.2

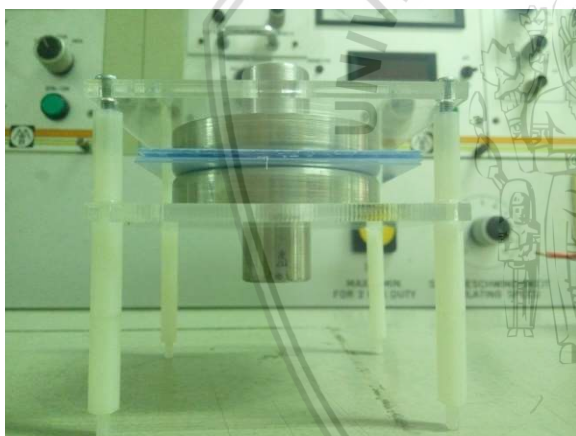


BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Tinjauan Umum

Pada bab 4 akan dianalisis dan diamati pengaruh variasi lokasi ditemukannya rongga udara (*void*), ketebalan objek uji, dan bentuk elektroda terhadap karakteristik peluahan parsial (*partial discharge*), obyek uji akan disusun oleh 3-4 lembar PVC yang ditumpuk satu sama lainnya hingga dicapai suatu nilai ketebalan tertentu dan untuk pemodelan rongga udara sebagai bentuk kecacatan yang ada di material isolasi, *polivynil chloride* akan dilubangi dengan diameter 1 cm dan ketebalan 0,5 mm dimana dimensi rongga ini konstan untuk setiap variable kemudian obyek akan diapit oleh kedua elektroda seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1 dan 4.2, sehingga akan diperoleh suatu kondisi isolasi dengan peluahan parsial dalam.



Gambar 4. 1. Susunan pengujian peluahan parsial pada material *Polivynil Chloride* susunan elektroda homogen (piring-piring)

Pada pengujian ini, diharapkan akan diketahui pengaruh lokasi rongga udara (*void*), variasi ketebalan bahan dielektrik, bentuk elektroda serta tingkat tegangan uji terhadap karakteristik tegangan mula peluahan, tegangan pemadaman peluahan, jumlah perulangan pulsa peluahan, dan besarnya muatan peluahan parsial dalam. Untuk pengolahan data jumlah pulsa peluahan dan muatan peluahan akan dibantu dengan software excel sebagai pengolah dan penampil data, data yang disimpan dari osiloskop ada 3 tipe ekstensi file yaitu JPG, CSV, dan SET, untuk pengolahan data akan digunakan tipe ekstensi file CSV. Dan sebagai perangkat simulasi distribusi medan listrik pada obyek uji akan dibantu dengan software FEMM 4.2 yang akan memberikan gambaran pola distribusi tegangan,

medan listrik, dan kurva medan listrik terhadap fungsi jarak di dalam bahan pada saat peluahan parsial terjadi.



Gambar 4. 2. Susunan pengujian peluahan parsial pada material *Polivynil Chloride* susunan elektroda non-homogen (bola-piring)

4.2 Pengaruh Variasi Lokasi Rongga Udara (Void) terhadap Tingkat Tegangan Mula Peluahan Parsial / Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) dan Tegangan Pemadaman Peluahan Parsial / Partial Discharge Extinction Voltage (PDEV)

Pada pengukuran peluahan parsial tujuan yang menjadi poin utama dari pengujian adalah kita mampu mengukur nilai tegangan yang membuat obyek uji mengalami peluahan. Tegangan ini disebut dengan tegangan mula peluahan parsial (*partial discharge inception voltage*). Setelah peluahan terjadi beberapa saat, tegangan akan diturunkan dan diukur pada tegangan berapa peluahan parsial berhenti, tegangan ini juga turut diamati untuk meninjau sejauh mana muatan mempengaruhi bahan dielektrik, tegangan ini kita sebut sebagai tegangan pemadaman peluahan parsial (*partial discharge extinction voltage*) (Tobing, Teknik Pengujian Tegangan Tinggi, 2012). Data hasil pengujian tegangan mula peluahan dan tegangan pemadaman peluahan dengan variasi lokasi rongga udara yang berbeda ditunjukkan pada table berikut.

Tabel 4. 1.

Pengaruh lokasi rongga udara (void) terhadap tingkat teggangan mula peluahan parsial dan teggangan pemadaman peluahan parsial pada isolasi ketebalan 2 mm

No	Posisi Rongga Udara dalam Material	Tegangan Mula Peluahan (kV)	Tegangan Pemadaman Peluahan (kV)
1	Rongga atas tengah	4,21	3,69
2	Rongga atas pinggir	7,61	5,75
3	Rongga tengah tengah	4,32	2,84
4	Rongga tengah pinggir	6,28	5,67
5	Rongga bawah tengah	5,21	4,67
6	Rongga bawah pinggir	7,27	4,67

Tabel 4. 2.

Pengaruh lokasi rongga udara (void) terhadap tingkat teggangan mula peluahan parsial dan teggangan pemadaman peluahan parsial pada isolasi ketebalan 2,5 mm

No	Posisi Rongga Udara dalam Material	Tegangan Mula Peluahan (kV)	Tegangan Pemadaman Peluahan (kV)
1	Rongga atas tengah	4,85	3,72
2	Rongga atas pinggir	7,82	5,75
3	Rongga tengah tengah	5,82	3,97
4	Rongga tengah pinggir	8,61	6,76
5	Rongga bawah tengah	6,02	3,40
6	Rongga bawah pinggir	7,58	5,61

Tabel 4. 3.

Pengaruh lokasi rongga udara (void) terhadap tingkat teggangan mula peluahan parsial dan teggangan pemadaman peluahan parsial pada isolasi ketebalan 3 mm

No	Posisi Rongga Udara dalam Material	Tegangan Mula Peluahan (kV)	Tegangan Pemadaman Peluahan (kV)
1	Rongga atas tengah	5,17	4,3
2	Rongga atas pinggir	8,65	7,78
3	Rongga tengah tengah	6,23	4,8
4	Rongga tengah pinggir	9,87	8,75
5	Rongga bawah tengah	6,57	4,02
6	Rongga bawah pinggir	6,27	3,95

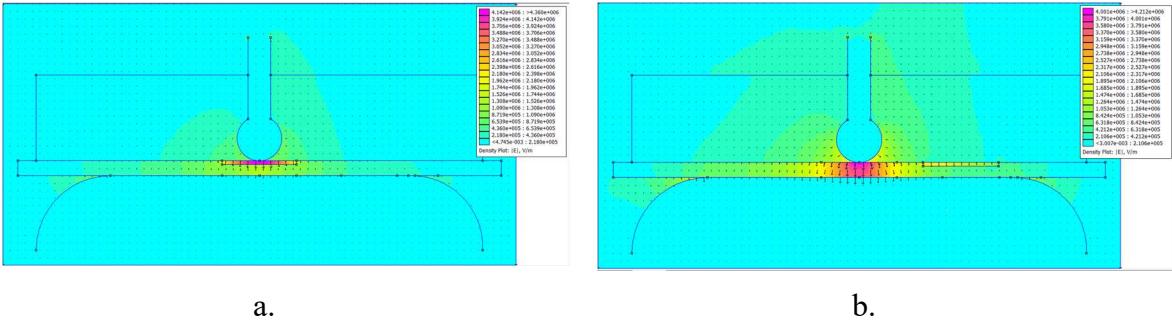
Tabel 4. 4.

Pengaruh lokasi rongga udara (void) terhadap tingkat tegangan mula peluahan parsial dan tegangan pemadaman peluahan parsial pada isolasi ketebalan 3,5 mm

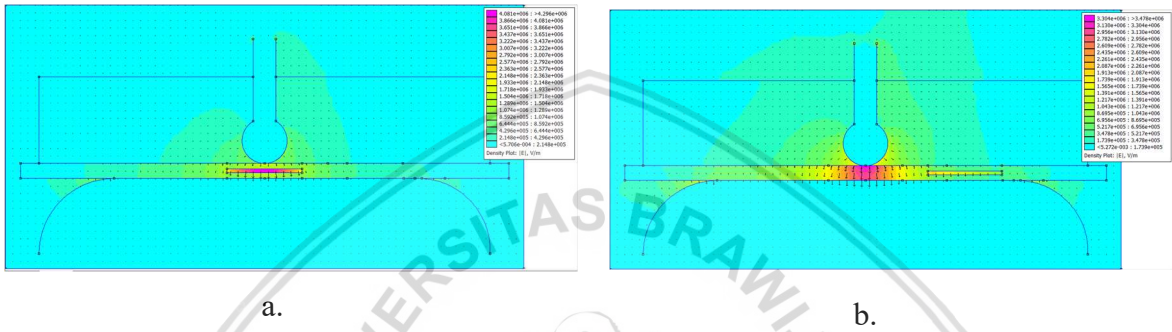
No	Posisi Rongga Udara dalam Material	Tegangan Mula Peluahan (kV)	Tegangan Pemadaman Peluahan (kV)
1	Rongga atas tengah	5,82	4,85
2	Rongga atas pinggir	10,46	8,24
3	Rongga tengah tengah	8,36	4,86
4	Rongga tengah pinggir	14,11	6,83
5	Rongga bawah tengah	10,76	5,80
6	Rongga bawah pinggir	10,51	6,23

Dari Tabel 4.1-4.4 ditunjukkan bahwa variasi pada lokasi rongga udara diberikan nilai tegangan mula peluahan yang berbeda. Nilai tegangan mula peluahan tertinggi didapatkan pada lokasi rongga udara di dekat elektroda piring. Hal ini menunjukkan adanya perbedaan tekanan medan listrik pada setiap titik, dimana medan maksimum dirasakan oleh rongga saat dekat elektroda bola (posisi atas tengah) sehingga tegangan mula peluahan terjadi pada tegangan yang lebih rendah. Rongga udara di pinggir menunjukkan nilai tegangan peluahan yang lebih tinggi dibandingkan dengan rongga yang berada di tengah, pola distribusi medan yang dibangkitkan oleh elektroda bola piring tidak homogen pada obyek uji yang digunakan, sehingga rongga dengan dimensi tetap dengan lokasi yang berbeda akan memberikan hasil pengukuran tegangan mula peluahan yang berbeda bergantung dari besar kecilnya medan listrik yang dirasakan oleh masing-masing titik.

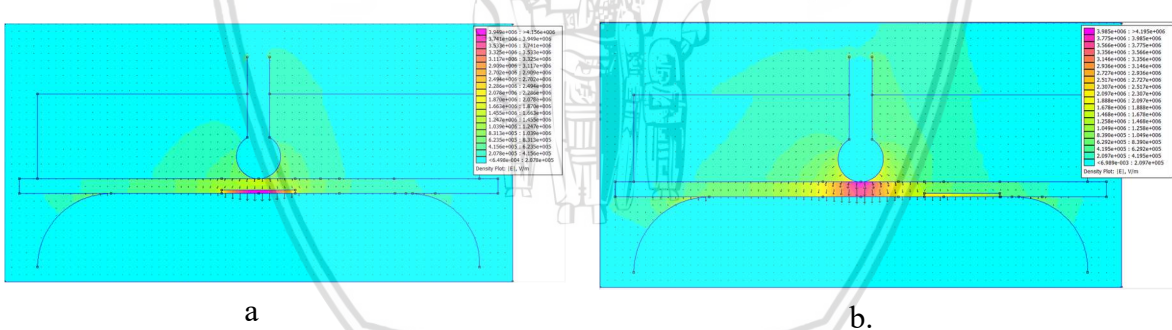
Pada kasus ketebalan isolasi bahan 3 mm dan 3,5 mm nilai dari tegangan mula peluahan untuk rongga bawah tengah dan pinggir nilai tegangan mula menghasilkan nilai yang tidak berbeda jauh, ditemukan bahwa untuk titik dekat elektroda piring yang terhubung dengan *ground*, medan listrik yang diterima oleh dielektrik adalah homogen sehingga hasil pengukuran memberikan nilai yang cenderung saling mendekati. Pada Gambar 4.3-4.5 ditunjukkan pola distribusi medan listrik yang terjadi pada obyek uji *Polivynil Chloride* dengan ketebalan 3 mm sebagai simulasi.



Gambar 4. 3. Simulasi distribusi medan listrik isolasi PVC ketebalan 2 mm : (a) atas tengah (b) atas pinggir



Gambar 4. 4. Simulasi distribusi medan listrik isolasi PVC ketebalan 2 mm : (a) tengah tengah (b) tengah pinggir



Gambar 4. 5. Simulasi distribusi medan listrik isolasi PVC ketebalan 2 mm : (a) bawah tengah (b) bawah pinggir

Dari hasil simulasi FEMM 4.2. pada Gambar 4.3-4.5 diamati pola distribusi medan yang diberikan berbeda untuk setiap posisi rongga udara akibat pola distribusi medan radial yang dihasilkan oleh elektroda bola. Dari gambar nilai medan tertinggi berada pada posisi dekat dengan elektroda fasa kemudian perlahan turun sebagai fungsi jarak (dapat dilihat pada kurva medan fungsi jarak pada Lampiran 3) dan nilai ini juga semakin kecil saat semakin ke pinggir dilihat melalui distribusi spektrum warna yang diberikan. Tegangan mula peluahan akan tercapai saat kekuatan medan listrik udara terlampaui pada 30 kV/cm, tegangan mula peluahan bergantung pada kemudahan suatu titik mencapai

tegangan tembus rongga udara. Semakin mudah titik mencapai tegangan tembus rongga udara maka tegangan mula peluahan yang terukur semakin kecil, hal ini berkorelasi dengan data yang didapatkan hasil pengukuran nilai tegangan mula terkecil didapatkan pada rongga atas tengah (piring dimana nilai medan dititik ini merupakan medan yang paling besar) kemudian lebih tinggi ke pinggir dan semakin besar saat mendekati elektroda.

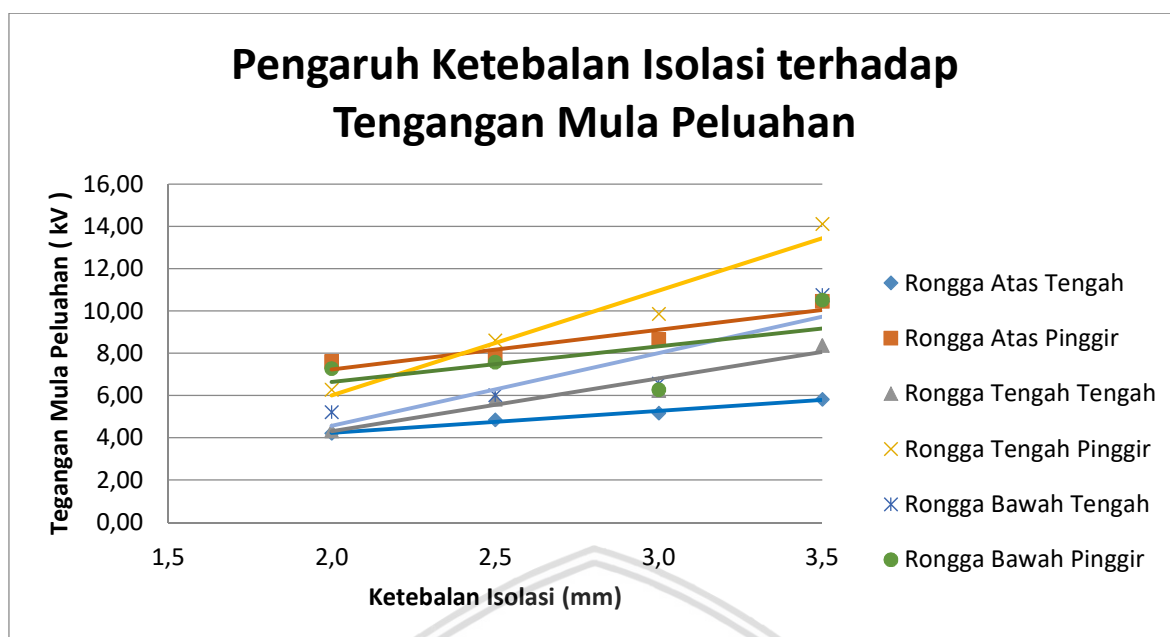
4.3 Pengaruh Variasi Ketebalan Material Isolasi terhadap Tingkat Tegangan Mula Peluahan Parsial / Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) dan Tegangan Pemadaman Peluahan Parsial / Partial Discharge Extinction Voltage (PDEV)

Bila elektroda diberi tegangan V , maka akan timbul medan elektrik (E). Medan elektrik ini memberi gaya kepada elektron-elektron agar bisa terlepas dari ikatannya dan menjadi elektron bebas. Jika suatu dielektrik memiliki kekuatan dielektrik E_k , maka terpaan elektrik yang dapat dipikulnya adalah $\leq E_k$ (Tobing, Teknik Pengujian Tegangan Tinggi, 2012). Tembus listrik baru terjadi jika terpaan elektrik yang melebihi kekuatan dielektrik itu berlangsung lebih lama daripada waktu tunda tembusnya. Pada ketebalan isolasi yang divariasikan untuk dimensi tebal yang semakin besar akan dibutuhkan nilai tegangan mula yang berbanding lurus dengan ketebalannya.

Tabel 4. 5.

Pengaruh ketebalan material isolasi terhadap tingkat tegangan mula peluhan parsial

No.	Ketebalan Dielektrik (mm)	Tegangan Mula Peluahan Parsial (kV)					
		Variasi Lokasi Void					
		Atas Tengah	Atas Pinggir	Tengah Tengah	Tengah Pinggir	Bawah Tengah	Bawah Pinggir
1	2,0	4,21	7,61	4,32	6,28	5,21	7,27
2	2,5	4,85	7,82	5,82	8,61	6,02	7,58
3	3,0	5,17	8,65	6,23	9,87	6,57	6,27
4	3,5	5,82	10,46	8,36	14,11	10,76	10,51



Gambar 4. 6. Pengaruh variasi ketebalan material dielektrik *Polivynil Chloride* terhadap tingkat tegangan mula peluahan parsial

Dari Table 4.5 nilai tegangan mula peluahan pada material dielektrik mengalami kenaikan seiring dengan meningkatnya ketebalan material terhadap lokasi dan dimensi rongga udara (*void*) yang konstan. Grafik dari pengaruh ketebalan dielektrik dari Table 4.5 dapat diamati pada Gambar 4.6. Dari grafik yang ditunjukkan terlihat saat material dielektrik nilai ketebalannya yang semakin besar akan dibutuhkan nilai tegangan mula yang semakin tinggi, untuk posisi rongga yang sama dan dimensi yang sama. Untuk memulai terjadinya tembus parsial, medan listrik di rongga udara terlebih dahulu harus terlampaui, medan yang menyebabkan rongga udara meluahkan adalah 30 kV/cm, untuk ketebalan dielektrik yang semakin besar dibutuhkan tegangan yang lebih tinggi untuk menyebabkan rongga udara meluahkan karena nilai medan berbanding terbalik terhadap jarak/ketebalan bahan, nilai tekanan medan udara sama dengan n kali (bergantung dari perbandingan relatif permitivitas bahan dielektrik dan permitivitas udara) tekanan medan dielektrik.

Pada grafik ditemukan bahwa untuk ketebalan dielektrik 3.5 mm pada posisi tengah pinggir didapatkan nilai tegangan mula peluahan parsial tertinggi, dari pola distribusi medan listrik yang disimulasikan oleh FEMM 4.2 titik yang jauh dari fasa elektroda nilai medan elektrik yang dirasakan kecil sehingga dibutuhkan terpaan tegangan yang lebih tinggi. Untuk memulai terjadinya peluahan dibutuhkan satu elektron mula untuk memulai banjir elektron (*avalanche*), pada kondisi ruang elektron yang ada cenderung kecil

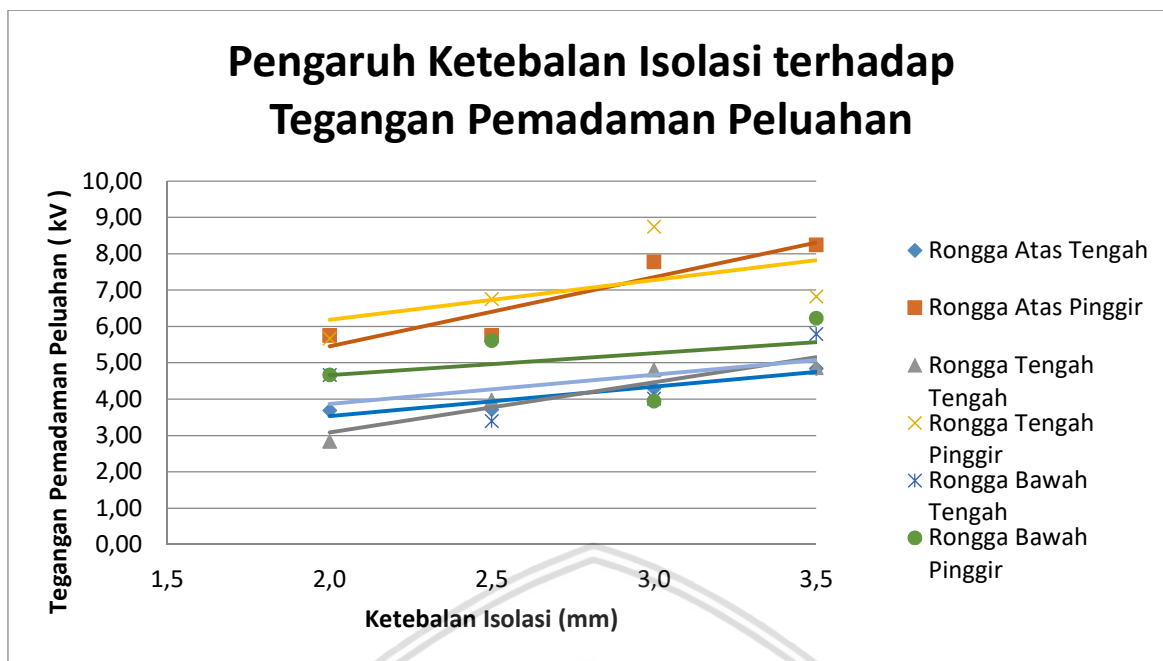
sehingga elektron mula diasumsikan dihasilkan dari pelepasan dari elektroda maupun dari material dielektrik. Untuk melepaskan elektron dari elektroda dan material dielektrik harus memenuhi syarat yaitu nilai energi yang dibangkitkan telah melampaui fungsi kerja dari material sebagai nilai minimum pelepasan elektron, dalam kasus rongga tengah pinggir medan elektrik yang muncul pada titik tersebut cenderung kecil sehingga lebih sulit untuk melepaskan satu ikatan elektron dari bahan, sehingga jika dibandingkan pada lokasi pinggir dekat elektroda bola maupun pinggir dekat elektroda piring besarnya tegangan yang diperlukan titik ini lebih tinggi, jika dibandingkan nilai fungsi kerja logam lebih kecil dibanding fungsi kerja material dielektrik.

Tabel 4. 6.

Pengaruh ketebalan material isolasi terhadap tingkat tegangan pemadaman peluhan parsial

No.	Ketebalan Dielektrik (mm)	Tegangan Pemadaman Peluhan Parsial (kV)					
		Variasi Lokasi Void					
		Atas Tengah	Atas Pinggir	Tengah Tengah	Tengah Pinggir	Bawah Tengah	Bawah Pinggir
1	2,0	3,69	5,75	2,84	5,67	4,67	4,67
2	2,5	3,72	5,75	3,97	6,76	3,40	5,61
3	3,0	4,30	7,78	4,80	8,75	4,02	3,95
4	3,5	4,85	8,24	4,86	6,83	5,80	6,23

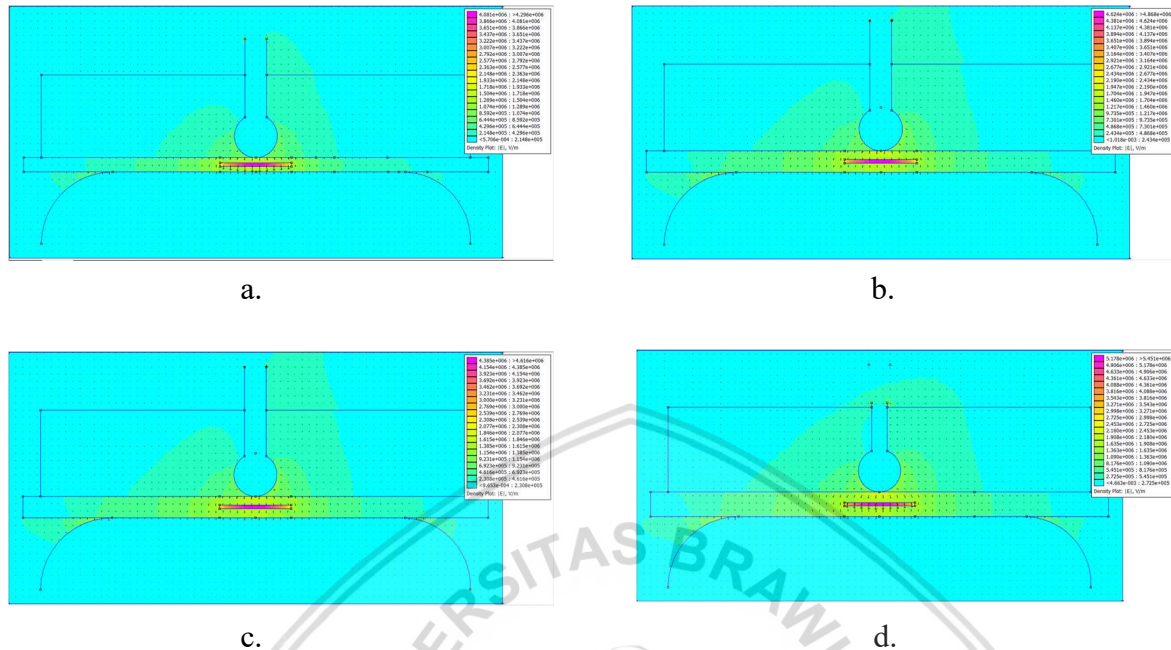
Dari data Table 4.6 nilai tegangan mula pemadaman pada material dielektrik mengalami kenaikan seiring dengan meningkatnya ketebalan material isolasi terhadap dimensi rongga udara (void) dengan dimensi konstan. Grafik dari pengaruh ketebalan dielektrik dari Table 4.6 dapat diamati pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7. Pengaruh variasi ketebalan material dielektrik *Polivynil Chloride* terhadap tingkat tegangan pemadaman peluahan parsial

Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 ketebalan isolasi juga mempengaruhi nilai tegangan pemadaman peluahan parsial. Nilai dari tegangan pemadaman cenderung memiliki nilai yang tidak selalu linier tergantung dari kemampuan bahan dalam menyimpan pembawa muatan (elektron) dalam jangka waktu yang panjang pada volumenya. Secara umum pembentukan dan akumulasi dari pemuatan ruang dalam material polimer menjadi masalah kritis dalam bahan dielektrik, karena menjadi penyebab penurunan kualitas isolasi karena muatan yang terjebak pada material menyebabkan proses fisis yaitu elektrotermal *aging*. Pengukuran muatan ruang yang tepat cukup rumit dilakukan. Pada polimer ada ketidakhomogenan yang hadir pada pola struktur penyusun polimer, menyebabkan titik-titik lokal yang mampu menyebabkan pemuatan hasil injeksi terperangkap pada titik-titik tersebut. Titik ini biasanya memiliki tingkat energi yang cenderung kecil sehingga tidak sampai menyebabkan dielektrik konduksi. Dari penelitian mengenai pengukuran penjebakan (*trapping*) dan pelepasan muatan ruang (*detrapping*) dikatakan bahwa banyaknya muatan yang mampu tersimpan dalam bahan linier terhadap besarnya tegangan uji yang diberikan pada material dielektrik (Haque, Dalai, Chatterjee, & Chakravorti, 2017). Pada tegangan ac, elektron akan teremisi dari katoda pada setiap setengah siklus negatif, dan elektron ini akan terperangkap pada bahan dalam daerah yang disebut *shallow trap* (Yulistya N, 2013). Keberadaan muatan sisa ini di dalam bahan dielektrik mengakibatkan peningkatan medan pada tegangan bolak-balik, karena pada setiap setengah siklus terjadi perbedaan muatan antara muatan ruang dan elektroda

didekatnya. Karena adanya fenomena tersebut karenanya biasanya ditemukan nilai tegangan pemadaman yang lebih kecil dibanding nilai tegangan mula peluuhannya.



Gambar 4. 8. Simulasi distribusi medan listrik pada isolasi *Polivynil Chloride* rongga tengah tengah ketebalan : (a) 2 mm (b) 2,5 mm (c) 3 mm (d) 3,5 mm

Dari Gambar 4.8 dengan variasi ketebalan bahan isolasi yang digunakan pola distribusi medan listrik yang dihasilkan elektroda terhadap obyek uji adalah sama yaitu membentuk pola distribusi medan radial yang semakin lemah ke pinggir, pengaruh ketebalan bahan yang digunakan hanya memberikan perbedaan kuat medan yang menerpa bahan dielektrik untuk tegangan yang sama, sehingga saat tebal bahan dinaikkan maka tegangan mula peluahan akan dibutuhkan semakin besar.

4.4 Pengaruh Variasi Elektroda Homogen dan Non-Homogen terhadap Tingkat Tegangan Mula Peluahan Parsial / Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) dan Tegangan Pemadaman Peluahan Parsial / Partial Discharge Extinction Voltage (PDEV)

Susunan dan konstruksi elektroda menghasilkan distribusi medan listrik yang berbeda (homogen dan non-homogen), jika terpaan elektrik yang dipikul dielektrik melebihi kekuatan dielektriknya maka akan terjadi proses ionisasi berantai yang akan membuat dielektrik mengalami tembus listrik. Elektroda II CIGRE merupakan metode pengukuran peluahan parsial yang ditujukan untuk mengamati pola peluahan parsial dengan terpaan tegangan jangka waktu yang panjang. Elektroda ini didesain untuk menghasilkan medan

elektrik yang tidak homogen pada obyek uji. Pada konstruksi elektroda homogen (piring-piring) nilai medan rata-rata (E rata-rata) akan sama dengan medan maksimum (E maksimum), tidak muncul medan lokal di sekitar elektroda/distribusi medan elektrik merata pada seluruh permukaan, akan diamati pengaruh distribusi medan yang disebabkan oleh konstruksi elektroda terhadap tingkat tegangan mula peluahan dan tegangan pemadaman peluahan parsial. Penelitian pengaruh konstruksi elektroda (pengaruh distribusi medan) dalam skripsi ini membantu memberikan sedikit gambaran bagaimana perilaku peluahan saat diberikan distribusi medan yang berbeda. Data hasil pengujian pengaruh susunan elektroda terhadap tingkat tegangan mula dan pemadaman peluahan parsial ditunjukkan seperti table berikut.

Tabel 4. 7.

Pengaruh lokasi rongga udara terhadap tingkat tegangan mula peluahan parsial dan tegangan pemadaman peluahan parsial pada konstruksi elektroda piring-piring dengan ketebalan dielektrik 3 mm

No	Posisi Rongga Udara dalam Material	Tegangan Mula Peluahan (kV)	Tegangan Pemadaman Peluahan (kV)
1	Rongga atas tengah	5,68	4,68
2	Rongga atas pinggir	5,63	4,73
3	Rongga tengah tengah	6,03	4,65
4	Rongga tengah pinggir	5,93	3,87
5	Rongga bawah tengah	6,37	4,98
6	Rongga bawah pinggir	6,38	4,78

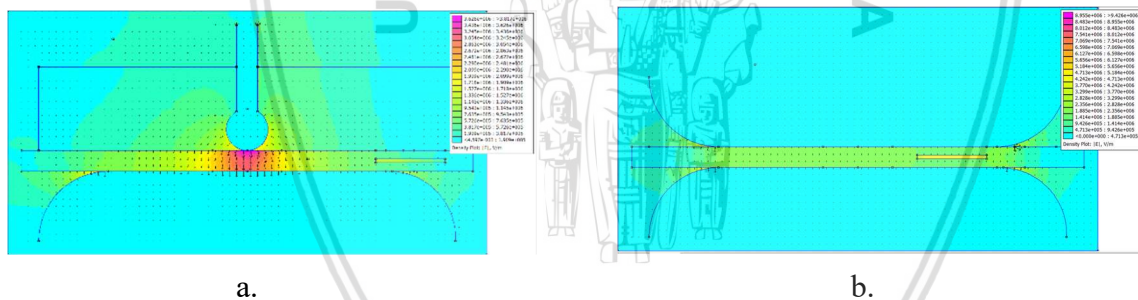
Tabel 4. 8.

Pengaruh lokasi rongga udara terhadap tingkat tegangan mula peluahan parsial dan tegangan pemadaman peluahan parsial pada konstruksi elektroda II CIGRE dengan ketebalan dielektrik 3 mm

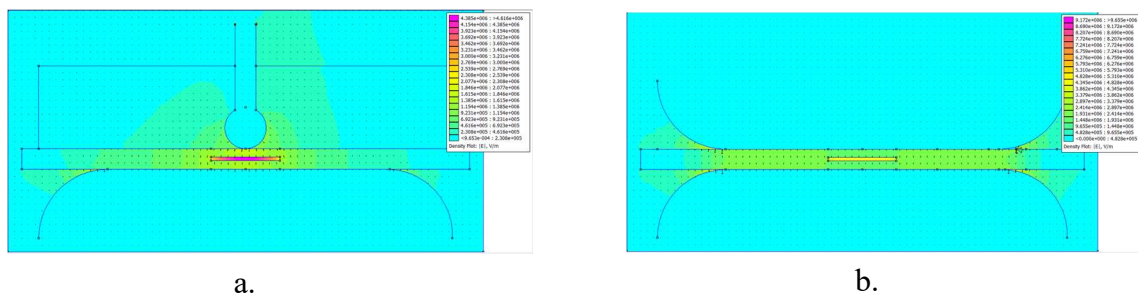
No	Posisi Rongga Udara dalam Material	Tegangan Mula Peluahan (kV)	Tegangan Pemadaman Peluahan (kV)
1	Rongga atas tengah	5,17	4,3
2	Rongga atas pinggir	8,65	7,78
3	Rongga tengah tengah	6,23	4,8
4	Rongga tengah pinggir	9,87	8,75
5	Rongga bawah tengah	6,57	4,02
6	Rongga bawah pinggir	6,27	3,95

Dari Table 4.7 pada lokasi yang berada di tengah maupun rongga yang berada dibagian pinggir memberikan tingkat tegangan mula peluahan dan tegangan pemadaman peluahan pada nilai yang mendekati sama. Hasil berbeda ditunjukkan dari Table 4.8 setiap

lokasi yang berbeda memberikan nilai tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan yang berbeda, karena pada konfigurasi elektroda II CIGRE (dengan susunan bola-piring) yang digunakan distribusi medan yang dihasilkan berbeda-beda di setiap titik, karena adanya medan lokal dan tidak homogen pada susunan elektroda. Pada pengujian pengaruh susunan elektroda terhadap tegangan mula peluahan dan tegangan pemadaman peluahan kendati distribusi medan yang dihasilkan oleh elektroda piring piring homogen pada setiap titik tetapi nyatanya dalam pengujian menunjukkan hasil berbeda untuk rongga udara titik atas, tengah, dan bawah pada pengujian distribusi medan pada dielektrik dipengaruhi oleh faktor jarak (s) sehingga saat mendekati elektroda piring medan yang diberikan semakin rendah hal ini dikarenakan karakteristik setiap bahan yang tidak sepenuhnya ideal sehingga distribusi medan piring piring yang cenderung sedikit turun sebagai fungsi jarak. Saat semakin jauh titik lokasi rongga udara dari elektroda fasa maka tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan akan membutuhkan nilai tegangan yang semakin tinggi. Gambar 4.9 dan 4.10 akan memberikan hasil simulasi distribusi medan listrik yang terjadi pada isolasi pada penerpaan medan non homogen dan homogen.



Gambar 4. 9. Simulasi distribusi medan listrik isolasi *Polivynil Chloride* ketebalan 3 mm rongga tengah pinggir elektroda : (a) Metode II CIGRE (b) Piring Piring



Gambar 4. 10. Simulasi distribusi medan listrik isolasi *Polivynil Chloride* ketebalan 3 mm rongga tengah tengah : (a) Metode II CIGRE (b)Piring Piring

Dari Gambar 4.9 dan 4.10 dapat diamati bahwa pola distribusi medan yang dihasilkan oleh faktor bentuk elektroda memberikan pola distribusi medan yang berbeda, sehingga dari sini akan mempengaruhi nilai besarnya tegangan mula peluahan yang terjadi pada obyek uji. Pada medan homogen yang diberikan oleh elektroda piring piring distribusi medan yang dirasakan oleh dielektrik adalah sama untuk setiap titik yang diberikan dapat dilihat dari spektrum warna yang diberikan sama untuk setiap posisi, sehingga besarnya tegangan mula peluahan memiliki nilai yang cenderung sama. Meskipun demikian nyatanya nilai medan ini sedikit turun seiring dengan penambahan nilai jarak, semakin dekat ke ground medan lebih kecil, sehingga ada sedikit perbedaan nilai tegangan mula peluahan yang terjadi pada rongga yang terletak di atas, tengah, dan bawah.

4.5 Pengaruh Variasi Tegangan Uji Arus Bolak-Balik terhadap Intensitas Perulangan Pulsa Peluahan Parsial

Jika nilai puncak dari tegangan uji mencapai nilai tegangan mula maka tegangan nyala akan diluahkan secara bersamaan. Dengan meningkatnya tegangan uji, maka secara berurutan rongga udara akan dimuati kembali oleh tegangan uji hingga tegangan mula tercapai kembali, dan peristiwa ini akan terus berulang hingga nilai tegangan uji berada di bawah nilai batas tegangan mulanya. Laju pengulangan pulsa n sebanding fungsi dari tegangan terpaan. Pada table ditunjukkan hasil pengukuran pengaruh tegangan uji terhadap laju pengulangan pulsa peluahan parsial. Karena pola jumlah peluahan yang bersifat acak dan berbeda untuk setiap siklusnya maka pengukuran akan dilakukan terhadap kedua siklus gelombang ac.

Tabel 4. 9.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah tengah ketebalan 2 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	4,32	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1
2	6,22	7	9	12	3	8	4	9	3	9	5
3	8,57	9	16	9	21	13	25	14	24	11	22
4	10,55	13	36	25	32	16	30	10	20	16	30
5	12,45	24	43	21	46	21	43	31	57	24	47

Tabel 4. 10.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah tengah ketebalan 2 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	5,21	1	0	2	1	1	1	1	0	1	1
2	7,16	5	3	3	3	4	2	5	4	4	3
3	9,33	5	1	6	1	8	0	8	3	7	1
4	11,31	20	4	12	8	12	2	14	4	15	5
5	13,24	18	7	13	6	19	8	18	7	17	7

Tabel 4. 11.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas tengah ketebalan 2 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	4,21	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
2	6,13	0	5	0	3	2	3	0	6	1	4
3	8,26	0	8	0	12	0	7	0	9	0	9
4	10,38	1	16	1	16	2	9	1	14	1	14
5	12,29	5	17	5	24	5	20	5	30	5	23

Tabel 4. 12.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas pinggir ketebalan 2 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	7,61	2	1	1	2	1	6	1	6	1	4
2	9,54	6	9	1	7	1	9	1	15	2	10
3	11,43	7	19	13	21	9	15	8	19	9	19
4	13,37	29	39	23	40	24	34	22	34	25	37
5	15,49	31	58	28	59	21	51	15	48	24	54

Tabel 4. 13.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah pinggir ketebalan 2 mm

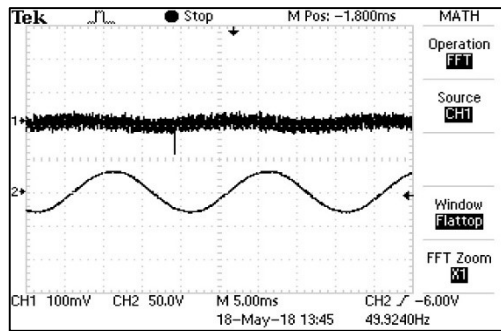
No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	6,28	0	2	0	1	0	1	0	1	0	1
2	8,32	4	6	2	5	2	6	5	4	3	5
3	10,29	10	18	15	25	9	17	15	21	12	20
4	12,28	12	21	14	25	17	22	20	22	16	23
5	14,25	13	27	13	34	16	31	19	29	15	30

Tabel 4. 14.

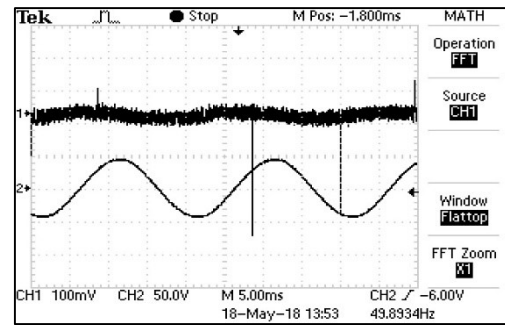
Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah pinggir ketebalan 2 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	7,27	3	1	4	2	1	2	0	4	2	2
2	9,79	7	4	11	3	17	6	11	1	12	4
3	11,82	18	14	17	10	21	8	21	12	19	11
4	13,74	35	21	45	24	41	25	45	20	42	23
5	15,76	49	37	49	32	40	40	46	35	46	36

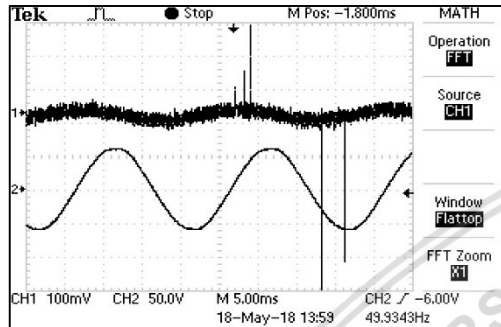
Dari Table 4.9-4.14 diamati bahwa nilai perulangan pulsa peluahan parsial berbanding lurus terhadap nilai kenaikan tegangan uji. Peluahan parsial merupakan fenomena yang bersifat stokastik dan probabilistik, sehingga kita tidak dapat menerka/memperkirakan jumlah pasti peluahan yang terjadi pada selang waktu tertentu. Dari Table 4.9-4.14 dapat diamati pada obyek rongga udara dengan lokasi yang berbeda jumlah perulangan pulsa yang diberikan pada siklus positif dan negatif gelombang tegangan bolak balik menunjukkan pola perulangan yang berbeda untuk masing masing posisi. Untuk rongga yang berada di atas dan di tengah perulangan pulsa cenderung terjadi pada siklus negative gelombang sedangkan untuk rongga di bawah jumlah perulangan pulsa lebih banyak terjadi pada siklus positif dari gelombang tegangan bolak balik. Pada gambar 4.11 akan ditunjukkan hasil pencuplikan pengukuran osiloskop untuk fenomena peluahan parsial yang terjadi pada rongga udara tengah tengah yang memiliki ketebalan 2 mm sebagai fungsi dari variasi tegangan bolak balik.



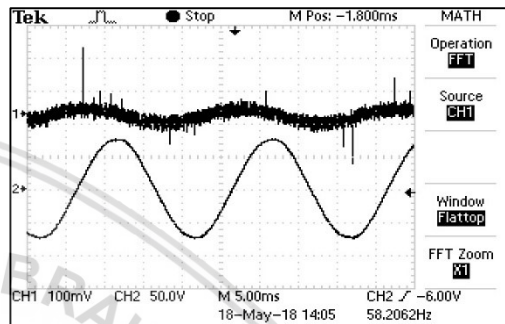
a.



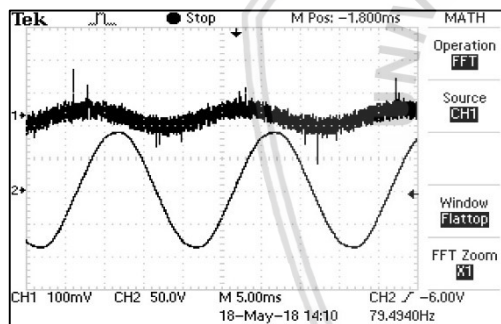
b.



c.



d.



e.

Gambar 4. 11. Pola perulangan pulsa peluahan parsial isolasi *Polivynil Chloride* rongga tengah tengah ketebalan 2 mm dengan tegangan uji: (a) 4,32 kV (b) 6,22 kV (c) 8,57 kV (d) 10,55 kV (e) 12,45 kV

Dari hasil pencuplikan pengukuran yang ditunjukkan oleh Gambar 4.11 dapat diamati bahwa perulangan pulsa peluahan yang terjadi di dalam bahan ikut naik seiring dengan kenaikan tegangan yang diberikan, hal ini berkaitan dengan besarnya energi ionisasi yang diberikan pada elektron saat tegangan divariasikan, semakin besar energi ionisasi yang diberikan (tegangan naik) maka akan semakin banyak benturan dan pelepasan muatan yang terjadi di dalam bahan sehingga perulangan pulsa peluahan naik.

Tabel 4. 15.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah tengah ketebalan 2,5 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	5,82	2	2	1	0	0	2	1	0	1	1
2	7,80	2	0	1	0	1	4	1	7	1	3
3	9,83	2	4	2	5	5	4	3	5	3	5
4	11,94	8	7	6	13	4	9	7	14	6	11
5	13,42	3	16	6	7	9	7	7	13	6	11

Tabel 4. 16.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah tengah ketebalan 2,5 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	6,02	1	0	2	0	1	0	1	0	1	0
2	8,19	3	3	5	2	4	0	4	0	4	1
3	10,22	12	1	11	3	22	3	13	1	15	2
4	12,27	14	5	21	9	26	6	27	10	22	8
5	14,27	23	6	38	6	26	4	24	2	28	5

Tabel 4. 17.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas tengah ketebalan 2,5 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	4,85	1	0	2	1	1	2	2	3	2	2
2	6,82	1	5	2	3	0	3	1	6	1	4
3	8,99	0	5	1	4	0	6	1	6	1	5
4	10,53	2	7	5	8	2	7	3	8	3	8
5	12,87	4	17	4	14	2	15	2	13	3	15

Tabel 4. 18.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas pinggir ketebalan 2,5 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4		(+) (-)	(+) (-)
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)		
1	7,82	0	2	1	4	0	1	0	1	0	2
2	9,82	4	7	2	14	4	19	2	8	3	12
3	11,89	1	9	8	20	9	26	13	23	8	20
4	13,89	9	33	9	51	6	30	9	39	8	38
5	15,77	14	36	10	44	13	43	18	37	14	40

Tabel 4. 19.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah pinggir ketebalan 2,5 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4		(+) (-)	(+) (-)
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)		
1	8,61	1	2	2	2	4	4	3	3	3	3
2	10,39	2	4	1	5	1	4	2	4	2	4
3	12,34	15	10	23	11	15	11	11	12	16	11
4	14,30	23	20	26	26	33	29	35	39	29	29
5	16,00	52	49	45	46	41	51	33	35	43	45

Tabel 4. 20.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah pinggir ketebalan 2,5 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4		(+) (-)	(+) (-)
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)		
1	9,08	3	1	4	3	4	2	5	2	4	2
2	11,31	25	15	39	26	35	21	36	26	34	22
3	13,36	45	30	44	33	44	33	45	30	45	32
4	15,36	43	32	43	34	44	29	43	35	43	33
5	17,37	46	47	41	26	44	25	50	28	45	32

Dari Table 4.15-4.20 diamati bahwa kenaikan nilai perulangan pulsa peluahan parsial berbanding lurus terhadap nilai kenaikan tegangan uji. Dari Table 4.15-4.20 dapat diamati pada obyek rongga udara dengan lokasi yang berbeda jumlah perulangan pulsa yang diberikan pada siklus positif dan negatif gelombang tegangan bolak balik menunjukkan pola perulangan yang berbeda untuk masing masing posisi. Untuk rongga yang berada di atas dan di tengah perulangan pulsa cenderung terjadi pada siklus negatif gelombang sedangkan untuk rongga di bawah jumlah perulangan pulsa lebih banyak terjadi pada siklus positif

dari gelombang tegangan bolak balik. Dari Tabel 4.15-4.20 variasi lokasi rongga udara memberikan pola perulangan pulsa peluahan yang berbeda untuk titik yang berbeda, dengan mengamati perbedaan perulangan pulsa peluahan yang terjadi pada siklus positif dan negatif dari gelombang mampu memberikan informasi mengenai dimana kecacatan dalam bahan bermula.

Tabel 4. 21.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah tengah ketebalan 3 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	6,23	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
2	8,42	2	2	1	4	2	2	4	5	2	3
3	11,06	4	9	3	5	6	7	8	12	5	8
4	13,43	22	19	10	20	21	16	21	16	19	18
5	15,39	30	27	11	6	13	13	10	30	16	19

Tabel 4. 22.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah tengah ketebalan 3 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	6,57	1	0	1	0	1	0	2	0	1	0
2	8,58	2	0	3	1	2	0	4	0	3	0
3	10,66	7	0	9	3	12	7	11	8	10	5
4	12,58	7	2	14	3	17	6	10	4	12	4
5	14,50	20	10	15	8	25	6	24	8	21	8

Tabel 4. 23.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas tengah ketebalan 3 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	5,16	1	3	0	3	0	5	2	2	1	3
2	7,14	4	4	4	11	3	10	4	10	4	9
3	9,15	3	10	3	13	3	13	2	16	3	13
4	11,49	2	25	6	40	3	32	5	25	4	31
5	13,97	5	43	4	54	8	53	3	55	5	51

Tabel 4. 24.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas pinggir ketebalan 3 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	8,65	0	2	1	1	0	2	0	4	0	2
2	11,29	0	3	2	14	2	16	3	21	2	14
3	13,70	6	29	9	24	10	27	7	23	8	26
4	15,27	5	25	11	52	15	49	19	55	13	45
5	17,53	13	53	19	59	15	41	20	32	17	46

Tabel 4. 25.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah pinggir ketebalan 3 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	9,87	15	18	13	10	11	14	9	13	12	14
2	11,73	12	27	21	26	14	27	27	33	19	28
3	13,70	27	40	24	43	26	48	25	49	26	45
4	15,71	41	56	34	60	27	63	4	20	27	50
5	17,53	5	15	7	12	3	3	3	8	5	10

Tabel 4. 26.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah pinggir ketebalan 3 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	6,27	5	1	4	3	13	2	7	3	7	2
2	8,43	13	3	6	5	16	4	30	2	16	4
3	10,08	27	7	28	6	33	3	20	6	27	6
4	12,10	49	24	45	11	30	16	34	12	40	16
5	14,38	58	14	57	19	51	18	52	10	55	15

Dari Table 4.21-4.26 diamati bahwa kenaikan nilai perulangan pulsa peluahan parsial berbanding lurus terhadap nilai kenaikan tegangan uji. Pada ketebalan yang berbeda pola peluahan pulsa yang terjadi tidak dipengaruhi oleh faktor ketebalan, hanya saja faktor variasi ketebalan memberikan tingkat tegangan mula yang berbeda-beda yang semakin besar tebal bahan yang digunakan maka untuk memulainya peluahan dibutuhkan tingkat tegangan yang lebih tinggi sebagaimana dijelaskan pada subab 4.3. Dari Table 4.21-4.26

dapat diamati pada obyek rongga udara dengan lokasi yang berbeda jumlah perulangan pulsa yang diberikan pada siklus positif dan negatif gelombang tegangan bolak balik menunjukkan pola perulangan yang berbeda untuk masing masing posisi. Untuk rongga yang berada di atas dan di tengah perulangan pulsa cenderung terjadi pada siklus negatif gelombang sedangkan untuk rongga di bawah jumlah perulangan pulsa lebih banyak terjadi pada siklus positif dari gelombang tegangan bolak balik. Dari Tabel 4.21-4.26 variasi lokasi rongga udara memberikan pola perulangan pulsa peluahan yang berbeda untuk titik yang berbeda, dengan mengamati perbedaan perulangan pulsa peluahan yang terjadi pada siklus positif dan negative dari gelombang mampu memberikan informasi mengenai dimana kecacatan dalam bahan bermula.

Pada data ke-5 dari Tabel 4.25 pada obyek uji rongga udara tengah pinggir data secara tiba-tiba mengalami penurunan perulangan pulsa, hal ini dapat dijelaskan berdasarkan fenomena *swarming pulsive microdischarge* (SPMD). Peluahan parsial sendiri berupa sederet pulsa yang disebut sebagai gelombang trichel (yang memiliki nilai waktu ke puncak beberapa ns dan frekuensi berkisar antara 100 kHz hingga MHz). Dengan peningkatan tegangan, kecepatan perpindahan ion positif akan semakin tinggi yang menyebabkan naiknya frekuensi pulsa. Saat aliran ion sebanding dengan pembangkitannya, maka peluahan akan terjadi lebih stabil dan akan terbentuk proses pra-peluahan tanpa pulsa (*glow*) (Yulistya N, 2013), proses *glow* sendiri merupakan tahap sebelum dielektrik benar-benar mengalami kegagalan sempurna apabila tegangan terpaan diberikan secara terus menerus. Peluahan parsial dapat dikategorikan menjadi tiga yaitu *ordinary partial discharge* (OPD), *swarming pulsive microdischarge* (SPMD), dan *pulseless partial discharge* (PLPD). *Ordinary partial discharge* (OPD) sendiri merupakan fenomena yang lebih sering ditemui di lapangan dimana pada tahap ini peluahan parsial yang terjadi masih belum stabil dan bersifat probabilistik sehingga akan ditemui data acak pada pengujian (tahap awal dari peluahan parsial), yang tidak lain adalah fenomena yang diamati pada skripsi penulis, ketiga kategori peluahan tersebut memiliki karakteristik yang berlainan dan merupakan proses lanjutan yang saling mempengaruhi satu sama lain. *Swarming pulsive microdischarge* (SPMD) terjadi sebagai tahap lanjutan dari *ordinary partial discharge* (OPD), karakteristik SMPD sendiri memiliki nilai pemuatan yang cenderung kecil dan memiliki perulangan pulsa yang lebih tinggi dibandingkan OPD. SMPD sendiri patut menjadi langkah antisipasi karena merujuk pada titik dimana kegagalan total tidak lama lagi terjadi, fenomena ini menandakan bahwa telah terjadi pelebaran kanal/perluasan kanal pada rongga udara yang ada dalam material (Izeki &

Tatsuta, 1984). Pada alat ukur yang kurang sensitif pola pulsa ini tidak teramati karena nilainya yang cenderung kecil sehingga sering diasumsikan tidak terjadi aktivitas peluahan di dalam material dan karena nilainya yang kecil nilai ini sering diasumsikan sebagai *noise* sehingga tidak teramati pada pengukuran seolah-olah jumlah perulangan pulsa turun. Pada data ke-5 Tabel 4.25 pada obyek uji rongga udara tengah pinggir telah terjadi proses lanjut degradasi bahan sehingga pulsa peluahan tidak lagi teramati karena nilainya yang terlampaui kecil yang menandakan bahwa kanal/rongga udara telah mengalami pelebaran sebagai akibat terpaan terus menerus dari peluahan parsial. Seperti yang dapat diamati bahwa ada saat-saat dimana nilai peluahnya tiba-tiba turun kemudian naik kembali secara acak, hal ini dipengaruhi oleh perilaku muatan yang terjadi di dalam rongga udara. Pada Gambar 4.12 ditunjukkan hasil pengukuran osiloskop untuk rongga tengah tengah ketebalan 3 mm dengan variasi tegangan uji, dengan kenaikan tegangan perulangan pulsa yang terjadi dalam bahan meningkat jika diterapkan tegangan terus menerus maka degradasi yang terjadi dalam bahan semakin cepat terjadi pada tingkat tegangan yang lebih tinggi.

Tabel 4. 27.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah tengah ketebalan 3,5 mm.

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	8,36	1	0	0	1	0	2	1	0	1	1
2	10,32	0	3	0	2	0	2	3	6	1	3
3	12,32	5	10	2	10	3	10	1	18	3	12
4	14,22	14	13	18	28	11	25	7	12	13	20
5	16,62	11	22	9	21	20	28	15	19	14	23

Tabel 4. 28.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah tengah ketebalan 3,5 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	10,76	1	0	1	1	2	1	2	2	2	1
2	12,15	2	0	2	0	1	0	3	1	2	0
3	14,04	6	4	10	5	8	2	5	8	7	5
4	15,31	7	2	9	2	8	2	10	3	9	2
5	16,69	18	4	18	7	18	6	15	3	17	5

Tabel 4. 29.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas tengah ketebalan 3,5 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	5,82	0	1	0	1	0	1	1	4	0	2
2	7,68	2	5	2	5	1	8	2	4	2	6
3	9,61	11	21	6	26	11	23	11	24	10	24
4	12,07	11	36	12	32	9	28	4	29	9	31
5	14,01	9	37	9	33	13	39	12	35	11	36

Tabel 4. 30.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas pinggir ketebalan 3,5 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	10,46	1	1	1	3	1	2	1	3	1	2
2	12,54	6	22	9	48	11	32	4	29	8	33
3	14,59	11	38	7	59	13	38	7	31	10	42
4	16,60	6	42	5	56	4	55	14	68	7	55
5	18,85	13	57	15	46	9	42	14	34	13	45

Tabel 4. 31.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah pinggir ketebalan 3,5 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	14,11	1	7	2	11	7	14	7	22	4	14
2	16,35	21	34	28	43	40	40	41	41	33	40
3	18,27	53	57	33	41	29	35	20	35	34	42
4	19,43	11	29	31	37	28	37	18	26	22	32
5	20,44	37	43	23	33	20	53	25	44	26	43

Tabel 4. 32.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah pinggir ketebalan 3,5 mm

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	10,51	4	3	14	6	14	2	16	9	12	5
2	12,40	18	3	19	8	19	5	23	9	20	6
3	14,37	26	17	30	23	37	27	30	31	31	25
4	16,32	38	33	28	39	43	30	36	25	36	32
5	18,52	48	27	50	37	47	29	47	28	48	30

Pada Tabel 4.27-4.32 ditunjukkan pola jumlah peluahan parsial yang terjadi dalam bahan dielektrik pada ketebalan 3,5 mm sebagai fungsi variasi posisi dan tegangan uji. Dari table diamati bahwa kenaikan nilai perulangan pulsa peluahan parsial berbanding lurus terhadap nilai kenaikan tegangan uji. Dari table dapat diamati pada obyek rongga udara yang berada di tengah jumlah perulangan pulsa yang cenderung terjadi pada siklus negatif dari gelombang ac sedangkan pada rongga udara yang berada di bawah jumlah perulangan pulsa lebih banyak terjadi pada siklus positif dari gelombang ac. Pola peluahan memiliki nilai yang fluktuatif dan cenderung tak bisa diprediksi seperti yang dapat dilihat pada table, meskipun ada kecenderungan pulsa naik seiring dengan kenaikan tegangan.

Tabel 4. 33.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas tengah ketebalan 3 mm elektroda piring piring

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	5,68	1	2	3	5	4	1	2	4	3	3
2	6,62	3	1	1	12	5	13	3	7	3	8
3	7,53	8	18	7	15	9	23	7	16	8	18
4	8,51	15	23	15	23	22	28	10	18	16	23

Tabel 4. 34.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga atas pinggir ketebalan 3 mm elektroda piring piring

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	5,63	1	7	2	6	1	3	2	6	2	6
2	6,52	8	9	4	6	6	12	5	12	6	10
3	8,01	18	18	14	17	14	20	11	17	14	18
4	10,42	20	25	23	32	33	28	28	30	26	29

Tabel 4. 35.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah tengah ketebalan 3 mm elektroda piring piring

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4		(+)	(-)
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)		
1	6,37	4	7	4	8	5	7	6	8	5	8
2	7,20	7	12	7	8	8	7	7	13	7	10
3	8,25	15	18	10	15	13	19	15	18	13	18
4	9,14	11	25	17	24	17	27	18	21	16	24

Tabel 4. 36.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga bawah pinggir ketebalan 3 mm elektroda piring piring

No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	6,38	1	3	2	2	0	4	0	2	1	3
2	7,39	5	6	1	6	6	10	7	12	5	9
3	8,21	16	21	8	22	6	18	12	15	11	19
4	9,15	14	22	13	20	15	21	16	21	15	21

Tabel 4. 37.

Pengaruh tegangan uji arus bolak-balik terhadap tingkat perulangan pulsa peluahan parsial obyek uji rongga tengah pinggir ketebalan 3 mm elektroda piring piring

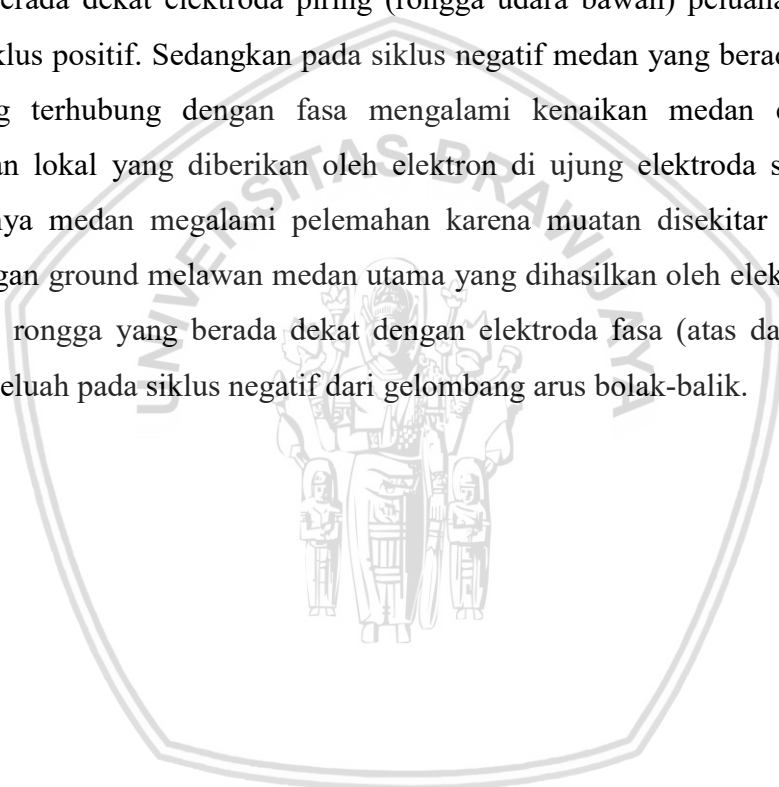
No.	Tegangan Uji (kV)	Jumlah Pulsa Peluahan (n)								n (Jumlah Pulsa rata-rata)	
		t1		t2		t3		t4			
		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	5,93	2	4	6	4	3	5	3	4	4	4
2	7,08	5	8	9	12	8	14	6	15	7	12
3	7,98	8	19	9	15	10	20	14	18	10	18
4	8,89	17	22	16	19	13	22	20	18	17	20

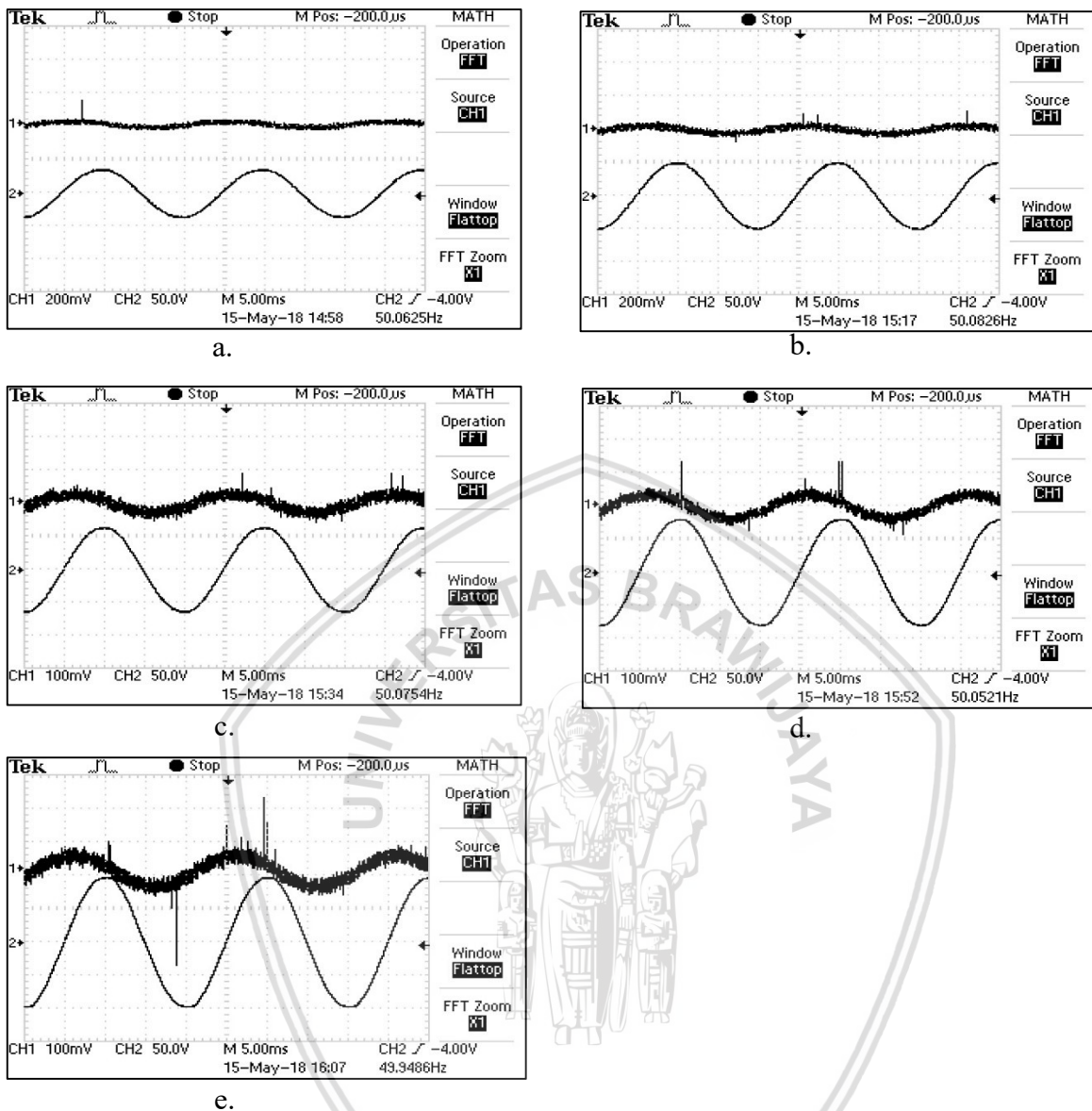
Tabel 4.33-4.37 menunjukkan hasil pengukuran peluahan parsial pada penerapan medan listrik homogen, dari table ditunjukkan bahwa pengaruh medan listrik yang dibangkitkan oleh elektroda piring piring menunjukkan hasil semakin tinggi medan listrik yang dibangkitkan (tegangan terpaan) maka jumlah perulangan pulsa peluahan yang terjadi meningkat. Medan memberikan percepatan pada elektron (meningkatkan energi ionisasi pada rongga) sehingga benturan yang terjadi pada ruang menjadi semakin sering terjadi sehingga banjir elektron menjadi semakin banyak, dan peluahan semakin mudah untuk terjadi pada rongga. Distribusi medan mempengaruhi besarnya tegangan mula peluahan yang terjadi pada tiap titik uji, sedangkan karakteristik jumlah perulangan pulsa peluahan akan dipengaruhi oleh besar kecilnya medan (tegangan uji) yang diterapkan pada dielektrik.

Di dalam rongga udara ketika tegangan mula telah terlampaui, elektron dan gas bermuatan di dalam rongga mengalami interaksi seperti ionisasi benturan, emisi, dan rekombinasi. Pada proses ionisasi dan emisi elektron yang berinteraksi dan menumbuk pembawa muatan akan menghasilkan elektron tambahan pada terpaan medan yang cukup tinggi elektron akan dipercepat sehingga akan menumbuk pembawa muatan lainnya sehingga dihasilkan elektron-elektron baru lainnya, proses ini akan terus berlangsung hingga medan listrik setimbang atau tanpa medan listrik, pada proses ini akan terjadi banjir elektron (*avalanche*) dalam rongga sehingga menyebabkan peluahan secara berulang apabila kanal peluahan telah menjembatani kedua elektroda (material dielektrik). Berbeda dengan proses ionisasi dan emisi, proses rekombinasi menyebabkan pemusnahan muatan dalam rongga atau medium, ini disebabkan elektron yang hadir pada rongga akan diserap kembali oleh elektroda dan menghasilkan ion dimana energi kinetik dan potensial pembawa muatan akan ditransformasikan menjadi panas atau energi cahaya dan pada proses ini elektron akan kembali bersatu dengan anion sehingga terjadi pemadaman peluahan secara sementara dan menyebabkan pulsa peluahan turun. Jika proses ini berlangsung secara terus menerus maka elektron akan terus bertambah sehingga peluahan lebih mudah terjadi.

Peluahan parsial ini perlu dideteksi karena jika berlangsung lama akan merusak dielektrik padat yang berbatasan dengan rongga, sehingga rongga semakin besar dan pada akhirnya menurunkan tegangan tembus dielektrik. Peluahan dalam rongga akan mengakibatkan beturan electron pada satu sisi rongga dan benturan ion pada sisi lain. Pada tegangan bolak balik, permukaan rongga akan menerima beturan elektron dan ion secara bergantian. Peluahan tegangan bolak balik yang berlangsung terus menerus dalam rongga

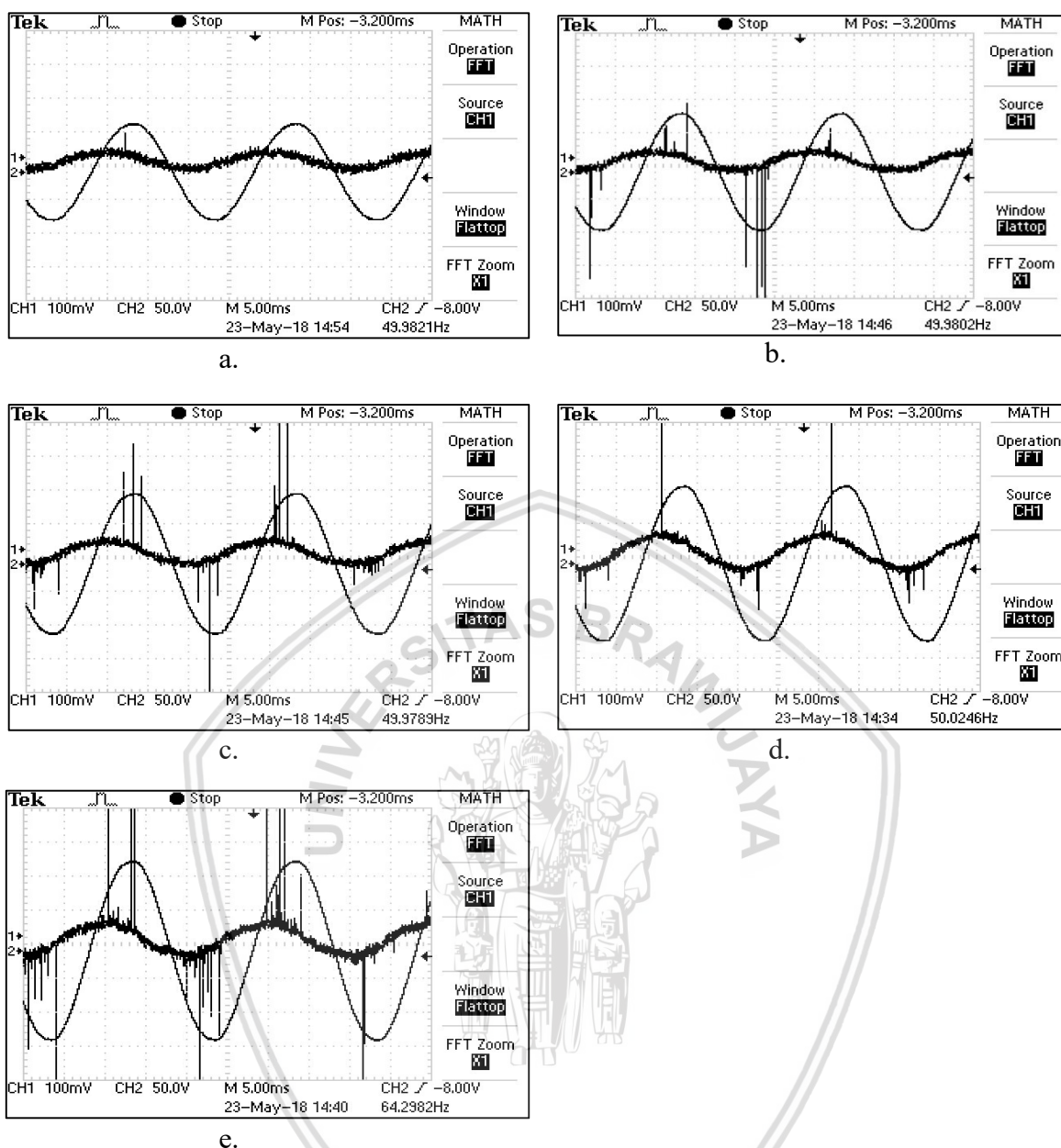
dielektrik padat akan menimbulkan terjadinya erosi pada permukaan rongga. Pada pengujian diatas diamati perbedaan jumlah pulsa peluahan yang terjadi pada masing-masing siklus dari gelombang arus bolak-balik. Dari pengujian ditemukan pada rongga udara yang terletak di atas dan tengah jumlah peluahan parsial cenderung terjadi pada siklus negatif dari gelombang arus bolak-balik sedangkan pada rongga udara yang terletak di bawah peluahan cenderung terjadi pada siklus positif dari gelombang arus bolak-balik. Hal ini dapat dijelaskan dengan teori efek polaritas dari elektroda, pada siklus positif medan ujung elektroda yang terhubung dengan fasa terjadi pelemahan medan sedangkan pada elektroda yang terhubung dengan ground nilai medan naik sedikit sehingga pada rongga yang berada dekat elektroda piring (rongga udara bawah) peluahan lebih mudah terjadi pada siklus positif. Sedangkan pada siklus negatif medan yang berada di ujung dari elektroda yang terhubung dengan fasa mengalami kenaikan medan elektrik karena hadirnya medan lokal yang diberikan oleh elektron di ujung elektroda sedangkan pada siklus negatifnya medan mengalami pelemahan karena muatan disekitar elektroda yang terhubung dengan ground melawan medan utama yang dihasilkan oleh elektroda, sehingga pada kasus ini rongga yang berada dekat dengan elektroda fasa (atas dan tengah) akan lebih mudah meluahkan pada siklus negatif dari gelombang arus bolak-balik.





Gambar 4. 12. Pola perulangan pulsa peluahan parsial isolasi *Polivynil Chloride* rongga bawah tengah ketebalan 3 mm dengan tegangan uji : (a)5,16 kV; (b)7,14 kV; (c)9,15 kV; (d)11,49 kV; (e) 13,97 kV

Dari gambar 4.12 seiring dengan kenaikan tegangan terpaan yang diberikan pada obyek uji fenomena peluahan parsial di dalam bahan mengalami peningkatan aktivitas, hal ini berkorelasi dengan semakin tingginya nilai medan yang terjadi dalam rongga mengakibatkan percepatan pergerakan electron sehingga elektron akan membentuk gas bermuatan lebih aktif yang lama kelamaan akan meningkatkan dan membentuk banjir electron dalam bahan sehingga lebih mudah untuk rongga mengalami tembus elektrik. Semakin tinggi tegangan kegagalannya maka akan semakin singkat waktu yang dibutuhkan hingga terjadinya kegagalan.



Gambar 4. 13. Pola perulangan pulsa peluahan parsial isolasi *Polivynil Chloride* rongga atas pinggir ketebalan 3.5 mm dengan tegangan uji:(a) 10,46 kV (b) 12,54 kV (c) 14,59 kV (d) 16,60 kV (e) 18,85 kV

Pada Gambar 4.13 ditunjukkan hasil pengukuran dari fenomena peluahan parsial pada obyek uji *Polivynil Chloride* yang digunakan pada ketebalan 3,5 mm dengan posisi rongga atas pinggir, variasi lokasi rongga memberikan pola perulangan pulsa peluahan yang berbeda selama pengukuran dari obyek atas pinggir diamati bahwa peluahan cenderung terjadi pada siklus negatif dari gelombang tegangan bolak-balik hal ini dapat diamati dengan pengaruh pergerakan muatan selama elektroda diberikan polaritas dimana karena adanya efek polaritas pada elektroda terjadi penguatan dan pelemahan medan di ujung dari

elektroda sehingga akan mempengaruhi besar kecilnya nilai perulangan pulsa peluahan yang terjadi di dalam bahan.

4.6 Pengaruh Variasi Lokasi Rongga Udara dan Ketebalan Isolasi terhadap Pelepasan Muatan Peluahan Parsial

Jika tegangan tembus listrik udara yang ada pada rongga telah terlampaui maka akan terjadi pelepasan muatan dalam rongga. Ketika terjadi peluahan parsial, C1 (model ekivalen rongga udara) membuang muatannya sehingga tegangan pada C1 berkurang sebesar ΔV . Perpindahan muatan dideteksi oleh alat ukur karena terjadi pada rangkaian luar obyek uji, perpindahan muatan ini berkaitan dengan energi yang didisipasikan peluahan dan dimensi dari rongga tempat terjadinya peluahan itu. Untuk pengukuran muatan nilai Q akan didapatkan dengan mengalikan nilai besarnya tegangan peluahan terhadap besarnya nilai kapasitansi dari kapasitor ukur yang digunakan sebagai masukan bagi osiloskop melalui hubungan yang dirumuskan berikut (Tobing, Teknik Pengujian Tegangan Tinggi, 2012):

$$Q = C \cdot \Delta V$$

Q = muatan peluahan (pC)

C = Nilai kapasitansi rongga udara (F)

ΔV = Jatuh tegangan peluahan parsial (V)

Untuk pengolahan data, data didapatkan dari ekstensi file yang tersimpan dari osiloskop dalam bentuk .CSV didapatkan deretan nilai tegangan terhadap waktu kemudian data akan difilter untuk menemukan besarnya nilai tegangan peluahan parsial. Pada gambar di bawah akan diamati bagaimana pengaruh kenaikan tegangan uji terhadap besarnya nilai muatan maksimum dan muatan rata-rata yang terjadi di siklus positif dan siklus negatif gelombang arus bolak balik.

Tabel 4. 38.

Pengaruh variasi posisi rongga udaran dan ketebalan isolasi terhadap tingkat pelepasan muatan peluahan parsial pada siklus positif tegangan positif obyek uji isolasi Polivynil Chloride

No.	Ketebalan Dielektrik (mm)	Muatan Peluahan Parsial (pC)					
		Variasi Lokasi Rongga Udara					
		Atas Tengah	Atas Pinggir	Tengah Tengah	Tengah Pinggir	Bawah Tengah	Bawah Pinggir
1	2,0	0	96	68	0	356	256
2	2,5	196	64	60	132	136	208
3	3,0	96	72	68	272	136	124
4	3,5	56	108	80	320	76	84

Tabel 4. 39.

Pengaruh variasi posisi rongga udaran dan ketebalan isolasi terhadap tingkat pelepasan muatan peluahan parsial pada siklus positif tegangan negatif obyek uji isolasi Polivynil Chloride

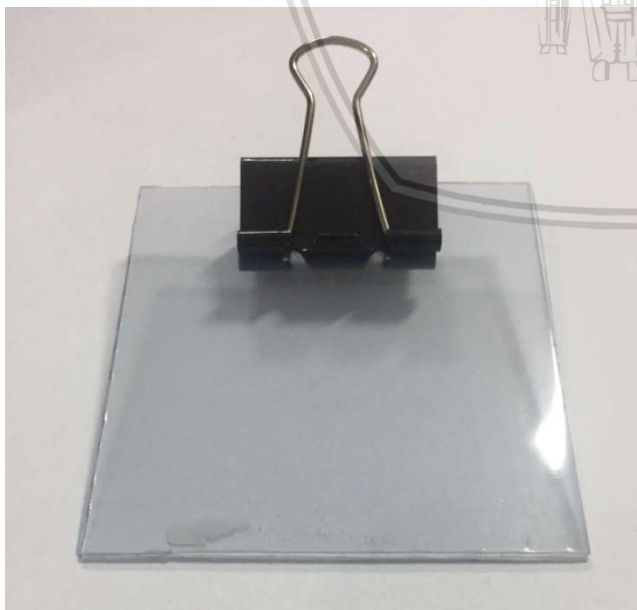
No.	Ketebalan Dielektrik (mm)	Muatan Peluahan Parsial (pC)					
		Variasi Lokasi Rongga Udara					
		Atas Tengah	Atas Pinggir	Tengah Tengah	Tengah Pinggir	Bawah Tengah	Bawah Pinggir
1	2,0	92	76	196	112	252	316
2	2,5	312	76	80	64	0	96
3	3,0	164	184	136	228	136	76
4	3,5	132	56	120	68	144	84

Dari Table 4.38 dan Tabel 4.39 untuk dimensi rongga yang berbentuk silinder dengan diameter 1 cm dan ketebalan 0,5 mm nilai muatan selama terjadinya peluahan memberikan nilai yang fluktuatif, untuk rongga yang sama nilai pemuatan yang terjadi untuk setiap titik tidak dipengaruhi oleh variasi lokasi rongga karena tegangan yang dirasakan rongga adalah tetap selama meluahkan. Untuk variasi ketebalan isolasi nilai pemuatan akan dipengaruhi oleh suku/variable kapasitansi dimana kapasitansi memiliki perbandingan terbalik dengan jarak/ketebalan dari material, sehingga dengan kenaikan variable ketebalan maka besarnya muatan yang dilepaskan akan cenderung turun. Seperti persamaan $q = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A_r}{(S-\Delta S)} \Delta V$ yang dikutip dari buku Bonggas L. Tobing dimana ϵ_r adalah permitivitas bahan isolasi padat, A_r luas penutup rongga, S adalah tebal isolasi, dan ΔS adalah tinggi/tebal rongga. Saat nilai ketebalan bahan semakin besar maka pembagi semakin besar dan nilai q akan turun.

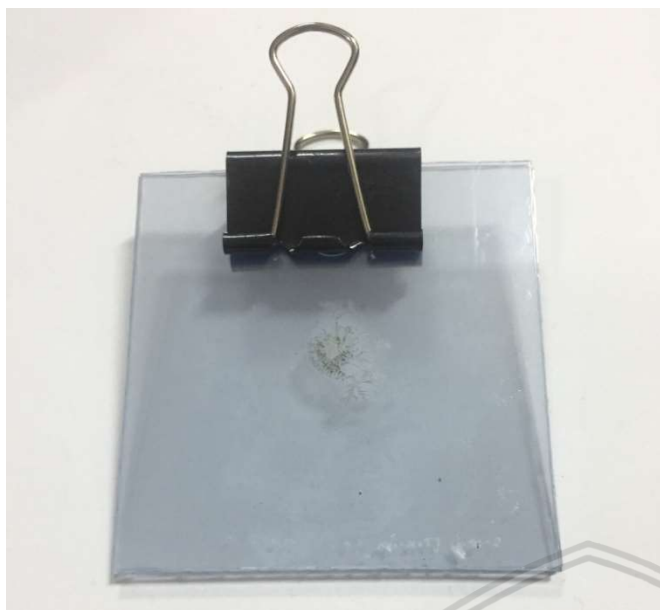
Fluktuasi muatan pada pengujian disebabkan oleh perilaku muatan yang terjadi di dalam rongga udara, muatan akan mengalami rekombinasi dan ionisasi secara bersamaan di dalam rongga, sehingga saat di dalam rongga cenderung mengalami rekombinasi maka nilai pemuatan menjadi turun sedangkan apabila proses ionisasi lebih dominan terjadi maka nilai pemuatan akan naik. Besarnya nilai muatan yang terjadi dipengaruhi oleh besarnya nilai energi ionisasi yang terjadi, saat nilai tegangan dinaikkan maka akan semakin besar juga nilai energi ionisasi yang diberikan pada elektron untuk terlepas dari ikatannya hal ini disebabkan oleh naiknya nilai medan elektrik yang diberikan pada obyek uji.

4.7 Pengaruh Aktivitas Peluahan Parsial terhadap Penurunan Kualitas Bahan Isolasi

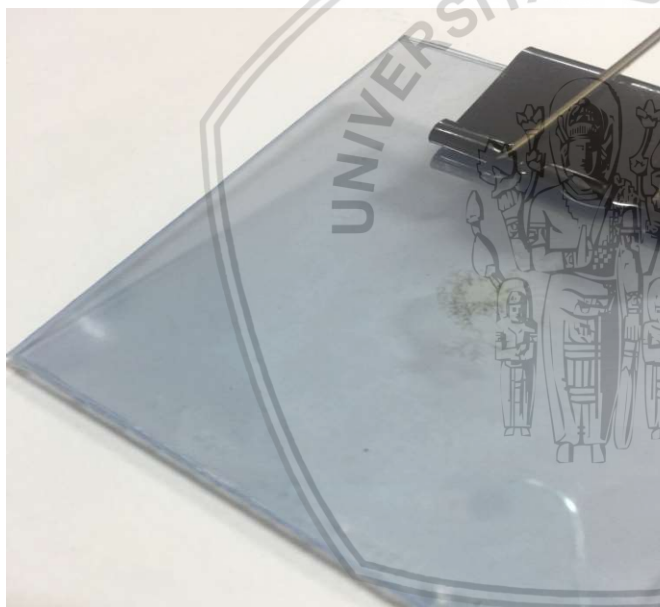
Disamping kegagalan elektrik dan kegagalan termal, teramati pula jenis kegagalan yang terjadi dalam jangka waktu lama dan jauh di bawah kekuatan termal bahan isolasi. Kegagalan akan diawali dengan peluahan parsial yang terjadi pada bagian dalam dari bahan seperti yang disebabkan oleh batas lapisan bahan isolasi, rongga udara, retakan, atau karena kontaminasi pada bahan karena kesalahan pada proses pabrikasi. Pada daerah ini akan terjadi peningkatan medan dan menyebabkan kegagalan lokal dan mampu menyebabkan kerusakan sebagian pada daerah dielektrik seperti terbentuknya kanal treeing. Pada gambar 4.14, 4.15, dan 4.16 akan ditunjukkan hasil perpaan tegangan dimana terjadi peluahan parsial pada bahan dielektrik.



Gambar 4. 14. Dielektrik PVC pengujian peluahan parsial rongga udara atas pinggir

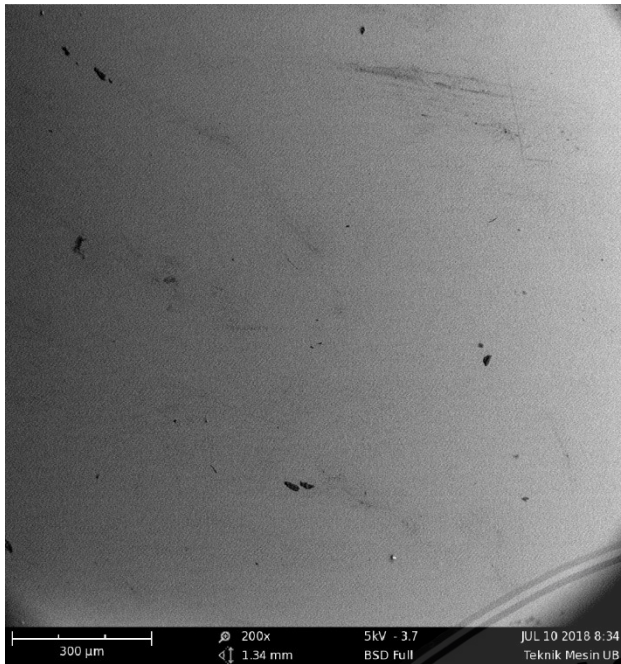


Gambar 4. 15. Dielektrik PVC pengujian peluahan parsial rongga udara tengah tengah



Gambar 4. 16. Tampak Samping dielektrik PVC pengujian peluahan parsial rongga udara tengah tengah.

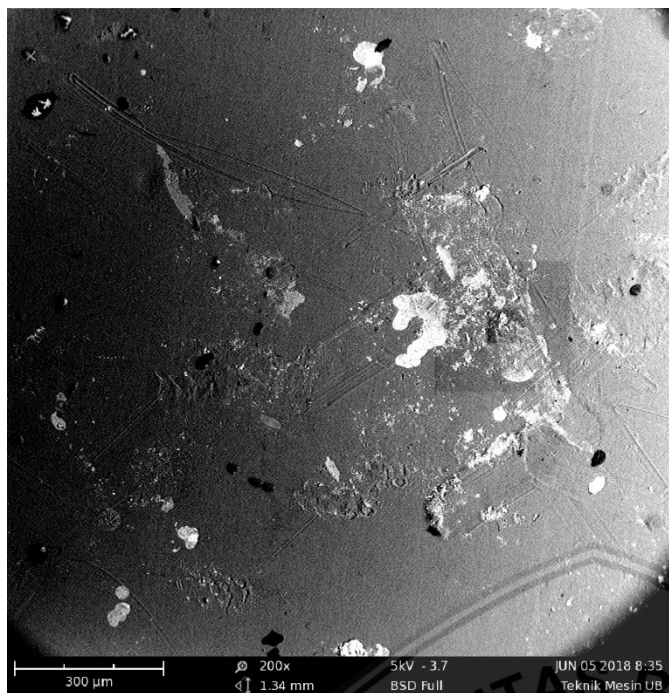
Dari gambar 4.14 pada material isolasi terlihat mulus tanpa ada retakan atau pun cacat dari permukaan akibat penerpaan tegangan uji pada fenomena peluahan parsial. Pada gambar 4.15 dan 4.16 teramati bahwa peningkatan aktivitas peluahan parsial pada bahan menyebabkan deformasi dan pembentukan kanal peluahan pada material, yang mana apabila diterpa secara terus menerus bahan nantinya akan mengalami kegagalan total. Pada gambar 4.17-4.22 akan ditunjukkan gambar hasil pengujian SEM (*Scanning Elektron Microscope*) yang mana akan membantu menganalisa bahan secara mikroskopik.



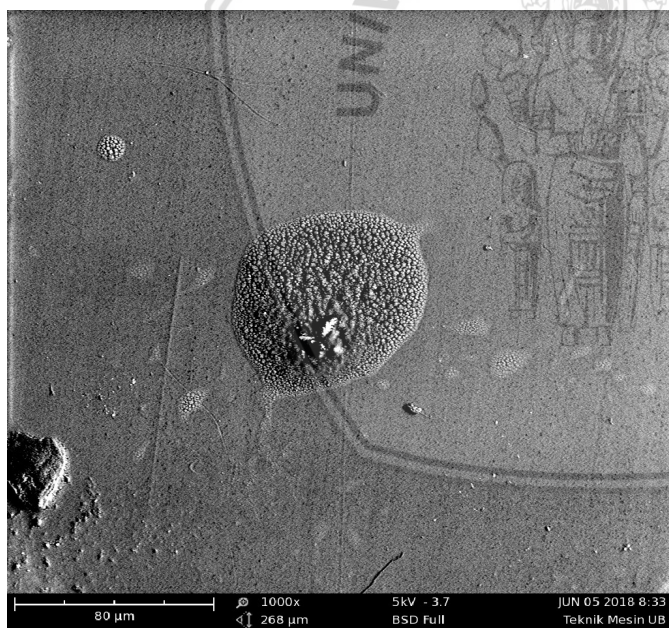
Gambar 4. 17. Hasil foto SEM obyek uji isolasi *Polivynil Chloride* sebelum diterpa *Partial Discharge* perbesaran 200 X



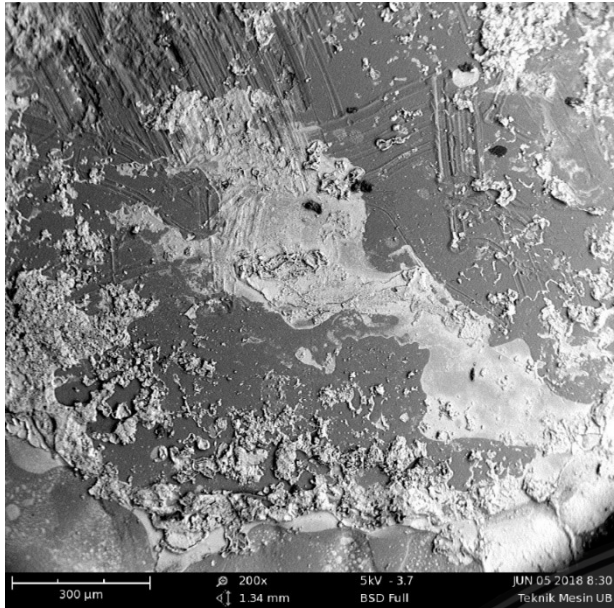
Gambar 4. 18. Hasil foto SEM obyek uji isolasi *Polivynil Chloride* sebelum diterpa *Partial Discharge* perbesaran 1000 X



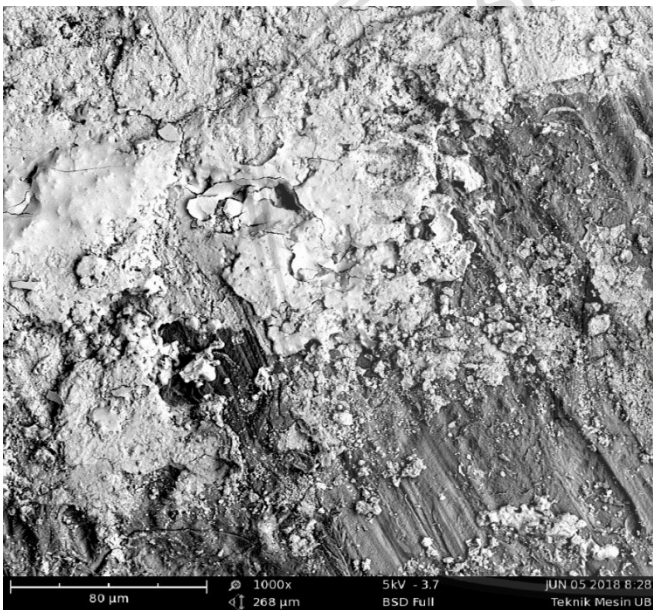
Gambar 4. 19. Hasil foto SEM obyek uji rongga udara atas pinggir elektroda piring piring ketebalan 3 mm perbesaran 200 X



Gambar 4. 20. Hasil foto SEM obyek uji rongga udara atas pinggir elektroda piring piring ketebalan 3 mm perbesaran 1000 X



Gambar 4. 21. Hasil foto SEM obyek uji rongga udara tengah tengah elektroda Metode II CIGRE ketebalan 3 mm perbesaran 200 X



Gambar 4. 22. Hasil foto SEM obyek uji rongga udara tengah tengah elektroda Metode II CIGRE ketebalan 3 mm perbesaran 1000 X

Dari hasil penelitian penangkapan gambar secara mikroskopik gambar 4.19 dan 4.20 bahwa apa yang terlihat pada permukaan material isolasi terlihat mulus dan tanpa cacat, ternyata memberikan penangkapan yang berbeda saat dianalisa secara mikroskopik. Terlihat bahwa terjadi peningkatan aktivitas dari peluahan dalam bahan yang ditandai oleh adanya bercak-bercak yang muncul pada permukaan isolasi yang merepresentasikan hasil degradasi peluahan dalam material. Pada gambar 4.21 dan 4.22 terlihat bercak yang muncul lebih banyak dan degradasi bahan telah menyebabkan perubahan struktur permukaan dari

material sebagai akibat dari adanya bombardir elektron dan ion positif pada permukaan bahan isolasi.

Pada waktu terjadi lucutan pada rongga akan timbul busur api, busur api akan menyebabkan jatuhnya tegangan dan mengalirnya arus. Busur api akan padam hingga terjadi peluahan selanjutnya. Pada waktu gas dalam rongga gagal, permukaan zat isolasi akan menjadi katoda dan anoda. Benturan electron pada anoda akan menyebabkan terlepasnya ikatan kimiawi dari zat padat. Demikian pula pemboman katoda oleh ion-ion positif akan mengakibatkan rusaknya zat isolasi padat karena kenaikan suhu dalam bahan. Karena peluahan di dalam rongga udara akan terjadi perubahan suhu, komposisi dan tekanan gas selama degradasi akibat peluahan. Sebagai akibat terjadinya oksidasi pada rongga udara maka akan terbentuk gas CO_2 dan H_2O . Pada tegangan bolak-balik, permukaan rongga akan menerima benturan electron dan ion positif secara bergantian. Peluahan sebagian menghasilkan produk samping (ozon, hydrogen, hidrokarbon, dll) yang merusak bahan secara kimia (Kuffel, Zaengl, & Kuffel, 2000). Lama kelamaan dinding zat padat bertambah tipis akibat benturan ini, dan menaikkan dimensi dari rongga udara dengan resistivitas yang kecil. Intensitas peluahan yang sama menimbulkan efek yang berbeda dari material isolasi, umur bahan bisa berkurang dalam hitungan detik, menit, bulan bahkan tahun.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis dari Skripsi ini, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Lokasi rongga udara mempengaruhi nilai tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan parsial. Semakin dekat rongga udara dengan bagian fasa/medan elektrik semakin tinggi maka tegangan mula peluahan akan semakin kecil.
2. Lokasi rongga menyebabkan perbedaan persebaran perulangan pulsa pada siklus positif dan negatif dari arus bolak-balik. Pada rongga bagian atas dan tengah peluahan cenderung terjadi pada siklus negatif, sedangkan untuk rongga di bagian bawah peluahan cenderung terjadi pada siklus positif. Hal ini dipengaruhi oleh efek polaritas yang diberikan oleh elektroda.
3. Susunan elektroda / pola distribusi medan listrik mempengaruhi nilai tegangan mula dan tegangan pemadaman peluahan parsial, semakin tinggi medan yang dirasakan rongga udara maka tegangan mula dan tegangan pemadaman akan semakin kecil.
4. Kenaikkan tegangan uji cenderung menyebabkan peningkatan aktivitas perulangan peluahan pulsa parsial dalam dielektrik, meskipun adanya fluktuasi pola muatan dalam rongga udara akibat rekombinasi dan ionisasi muatan.
5. Variasi lokasi rongga tidak mempengaruhi besarnya muatan peluahan sedangkan untuk ketebalan isolasi yang berbeda saat ketebalan isolasi dinaikkan nilai muatan peluahan menjadi semakin kecil. Hal ini dikarenakan muatan yang terjadi saat pelepasan muatan berbanding terbalik terhadap suku S (tebal/tinggi isolasi).
6. Aktivitas peluahan parsial menyebabkan degradasi pada dielektrik hal ini dibuktikan dengan penemuan bercak-bercak teramati pada permukaan bahan isolasi.

5.2 Saran

Dalam penelitian ini masih terdapat banyak kekurangan yang diharapkan dapat lebih disempurnakan dengan melakukan penelitian lebih lanjut. Beberapa hal yang perlu diperhatikan antara lain:

1. Pada penelitian berikutnya dapat dilakukan variasi terhadap jenis bahan, kelembapan, suhu, pengaruh kontaminasi, tekanan, dan lain-lain.
2. Pada penelitian berikutnya dapat digunakan alat ukur yang memiliki sensitifitas yang cukup besar sehingga bisa merekam peluahan parsial yang memiliki nilai kecil (terkhusus saat peluahan parsial berubah menjadi *Swarming Pulse Micro Discharge*).
3. Penelitian berikutnya dapat digunakan *High Pass Filter* sebagai perangkat pembantu pemisah gelombang peluahan parsial dengan *noise* yang tidak diinginkan untuk kekakuratan data.
4. Pada penelitian berikutnya pelibatan alat-alat ukur khusus penghitung fenomena peluahan parsial seperti *Transient Earth Voltage*, *High Frequency Current Transformer*, *Partial Discharge Detector*, dan *Partial Discharge Meter* dapat digunakan untuk memberikan hasil pengukuran yang lebih detail.

DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, P. D. (1983). *Teknik Tegangan Tinggi Suplemen*. Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Arora, R., & Mosch, W. (2011). *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Burgener, H., & Frohlich, K. (2001). Probability of Partial Discharge Inception in Small Voids. *IEEE*, 298-302.
- di Lorenzo del Casale, M., & Schifani, R. (2007). Partial Discharge Tests Using CIGRE Method II Upon Nanocomposite Epoxy Resin. *IEEE*, 341-344.
- Elektroindustrie, Z. :. (2017). *Measurment and diagnosis of partial discharge in low voltage applications <1000 volts*. Frankfurt am Main, Germany: ZVEI-German Electrical and Electronic Manufacturer's Association Electrical Winding & Insulation System Division.
- Haque, N., Dalai, S., Chatterjee, B., & Chakravorti, S. (2017). Investigations on Charge Trapping and De-trapping Properties of Polymeric Insulators trough Discharge Current Measurment. *IEEE*, 583-590.
- Henriksen, M., & Holboll, J. (1992). An Improved Method/Setup for Extended Testing after The CIGRE, Method II. *IEEE*, 144-148.
- Ishida, T., Mizuno, Y., Nagao, M., & Kosaki, M. (1991). Development and Application of Partial Discharge Analyzing System for Swarming Pulsive Microdischarges. *Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials* (p. 676). Tokyo: IEEE.
- Ishida, T., Nagao, M., & Kosaki, M. (1989). Effect of Instantaneous Voltage Change Rate on Apperance of Swarming Pulsive Microdischarges. *IEEE*, 205-208.
- Izeki, N., & Tatsuta, F. (1984). Three Types of Partial Discharge in Electrical Insulation. *IEEE*, 327-331.
- Kind, D. (1993). *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*. Bandung: ITB.
- Kuffel, E., Zaengl, W., & Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering Fundamentals*. Oxford: Butterworth-Heinemann Linacre House.
- Li, J., Han, X., Liu, Z., Yao, X., & Li, Y. (2015). PD Characteristics of Oil-pressboard Insulation under AC and DC Mixed Voltage. *IEEE*, 444-450.
- Li, J., Zhang, L., Han, X., Yao, X., & Li, Y. (2016). PD Detection and Analysis of Oil-pressboard Insulation under Pulsed DC Voltage. *IEEE*, 324-330.

- Paoletti, G., & Golubev, A. (1999). Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Systems. *TAPPI Conference* (pp. 124-138). TAPPI.
- Rokunohe, T., Kato, T., Kojima, H., Hayakawa, N., & Okubo, H. (2017). Calculation Model for Predicting Partial Discharge Inception Voltage in a Non-uniform Air Gap while Considering the Effect of Humidity. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1123-1130.
- Tobing, B. L. (2012). *Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. Ciracas, Jakarta: Erlangga.
- Yulistya N, I. M. (2013). *Teknik Tegangan Tinggi : Prinsip dan Aplikasi Praktis*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Zuberi, M., Masood, A., Khan, M., Husain, E., & Anwar, A. (2008). Estimation of Partial Discharge Inception Voltages due to Voids in Power Cables. *Int. Conf. on Energy & Environment*, 345-348.

